



**NYUGAT-MAGYARORSZÁGI EGYETEM
KITAIBEL PÁL KÖRNYEZETTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA
GEOKÖRNYEZETTUDOMÁNY PROGRAM**

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

**VILLÁMKISÜLÉSEKHEZ TÁRSULÓ
FELSŐLÉGGÖRI ELEKTRO-OPTIKAI EMISSZIÓK ÉS
SCHUMANN-REZONANCIA TRANZIENSEK VIZSGÁLATA**

Bór József

Témavezető: Dr. Sátori Gabriella, a földtudomány kandidátusa

SOPRON

2010

**VILLÁMKISÜLÉSEKHEZ TÁRSULÓ
FELSŐLÉGKÖRI ELEKTRO-OPTIKAI EMISSZIÓK ÉS
SCHUMANN-REZONANCIA TRANZIENSEK VIZSGÁLATA**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

*a Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar Kitaibel Pál Környezettudományi
Doktori Iskola, Geokörnyezettudomány program

Írta:

Bór József

**Készült a Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar Kitaibel Pál
Környezettudományi Doktori Iskola Geokörnyezettudomány programja keretében

Témavezető: Dr. Satori Gabriella, a földtudomány kandidátusa

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton % -ot ért el,

Sopron/Mosonmagyaróvár

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr.) igen /nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron/Mosonmagyaróvár,

.....
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....
Az EDT elnöke

Studying lightning discharge related upper atmospheric transient luminous events and Schumann resonance transients

Abstract

Transient luminous events (TLEs) are various brief optical emissions between the top of the thunderclouds and the lower boundary of the ionosphere. The charge moment change (CMC) of the parent lightning flash is an important parameter that characterizes the strength of the evolving quasi-static electric field in the upper atmosphere in which some of the TLEs are initiated. The CMC in lightning flashes can be remotely estimated from the extremely low frequency (ELF, 3Hz-3kHz) radiation of intense discharges, e.g. from Schumann resonance transients (SRTs), which are wave packets with frequency components near the lowest resonance frequencies of the Earth-ionosphere waveguide. SRTs carry information also on the polarity, location, and current moment of the source discharge.

Comparison of current moment spectra deduced from SRT records in the István Széchenyi Geophysical Observatory in Hungary, and in an Israeli ELF recording station near Mitzpe Ramon for the same parent discharge indicates that passing the day-night terminator line in the Earth-ionosphere waveguide affects the amplitudes of ELF waves.

Comparing the CMCs of TLE parent flashes revealed that the distributions of CMCs connected to source flashes of red sprite type TLEs observed in Western Europe in summertime and in the Eastern Mediterranean region in wintertime are similar to each other and they resemble more the CMC statistics of source flashes of red sprites in North America than in Japan. The results also suggest that sprite halo type TLEs are more frequently produced by negative polarity lightning discharges than by positive ones in general and the relative occurrence rates of these emissions in the sea/coastline/land regions depend on the polarity of the source.

The thesis reports on the establishment of an optical observation site in Sopron, Hungary, and discusses the experiences as well as the outcome of observations committed in Central Europe mostly in the summer of 2007. According to the results, the general properties of TLEs in the observed region are closer to those observed in North America during summer than to the characteristic properties of TLEs found in Japan during wintertime.

By combining the optical records from Sopron and from the Astronomical and Geophysical Observatory in Modra, Slovakia with the lightning data from the LINET lightning location network and from the very high frequency interferometric SAFIR system of the Hungarian Meteorological Service, it was shown that the height and vertical extent of columniform and carrot sprites are different and also the variability of these parameters is unequal for the two shapes. The results suggest that the orientation of the discharge channel of the parent lightning flash may affect the configuration of the appearing red sprites in space.

Villámkisülésekhez társuló felsőlégköri elektro-optikai emissziók és Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálata

Kivonat

A felsőlégköri elektro-optikai emissziók (FEOE-k) a zivatarfelhők és az ionoszféra alsó határrétege között kialakuló különböző gázkisülési jelenségek. Az intenzív villámkisülésekhez köthető FEOE-k megjelenését kiváltó kvázi-stacionárius elektromos tér erősségére a tér létrejöttét okozó forrásvillám töltésmomentum-változásából következtetni lehet. A töltésmomentum-változás a kisülés közben kisugárzott extrém alacsonyfrekvenciás elektromágneses hullámok jeleinek, a Schumann-rezonancia tranzienseknek (SRT) az analízise alapján becsülhető. A SRT-ek a hullámvezető pillanatnyi állapotáról, valamint a forráskisülésük polaritásáról, földrajzi helyéről és áramerősség-változásáról is hordoznak információt.

A dolgozatban ismertetett eredmények szerint a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban rögzített SRT-ek felhasználásával kimutatható a Föld-ionoszféra hullámvezető nappali-éjszakai aszimmetriájának a hullámvezetőben terjedő alacsonyfrekvenciás elektromágneses hullámok spektrális amplitúdóira gyakorolt, frekvenciafüggő hatása, ha az izraeli Mitzpe Ramon melletti megfigyelőállomás egyidejűleg rögzített adatait is bevonjuk az elemzésbe. A bolygószerke előforduló FEOE-k megjelenését kiváltó villámkisülések SRT-ekből levezett tulajdonságai alapján megállapítható, hogy a Nyugat-Európa fölött nyáron, és a keleti mediterrán területek fölött télen megfigyelt vörös lidércek forrásvillámjainak vertikális töltésmomentum-változása hasonló eloszlást mutat, mint Észak-Amerikában a nyári időszakból, de különbözőt, mint Japán közelében a téli időszakból származó statisztikák. Az eredmények alapján a lidércudvarok kialakulását globálisan többségében negatív polaritású villámkisülések okozzák, és ezen emissziók előfordulásának hely szerinti eloszlása (vízfelület/partvidék/szárazföld) a polaritásuktól függ.

A dolgozat számot ad egy felsőlégköri optikai megfigyelőrendszer felállításáról Sopronban, tárgyalja a megfigyelések tapasztalatait, és ismerteti a 2007-ben folytatott észlelések eredményeit. Ezek szerint a közép-európai FEOE-k tulajdonságai inkább az Észak-Amerika fölött nyáron megfigyelt emissziók jellemzőihez állnak közelebb, mint a Japán közelében télen észleltekéihez. A szlovákiai Astronomical and Geophysical Observatory, a LINET villámfigyelő-hálózat és az Országos Meteorológiai Szolgálat egyidejű észleléseinek a bevonásával sikerült kimutatni, hogy az oszlop és a répa alakú vörös lidércek magassága és vertikális kiterjedése, valamint e paraméterek változékonysága különböző, továbbá, hogy a forrásvillám horizontális irányultsága hatással lehet a megjelenő emissziók térbeli elrendeződésére.

Mottó:

„Az elme szereti az ismeretlent. Szereti azokat a képeket, amelyek értelme ismeretlen, hiszen elménk értelme maga is ismeretlen.”

"The mind loves the unknown. It loves images whose meaning is unknown, since the meaning of the mind itself is unknown."

-- René Francois Ghislain Magritte (1898 – 1967) belga szürrealista festőművész

Ezt a dolgozatot Édesanyámnak, Édesapámnak és nagyszüleim emlékének ajánlom.

Köszönöm feleségemnek, Orsinak, a megértését és mérhetetlen segítségét. Köszönöm lányaimnak, Dorinának és Anikónak, a szeretetet, ami mindig átsegített a nehézségeken.

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Satori Gabriellának, a munkám elvégzéséhez nyújtott szakmai segítségért, támogatásáért, türelméért, megértéséért és kedvességéért.

Tartalomjegyzék

A dolgoztában előforduló rövidítések	3
Bevezetés	6
A dolgozat témája és célkitűzései	7
I. Felsőlégtöri elektro-optikai emissziók (FEOE-k)	10
I.1. Vörös lidérc (<i>red sprite</i>)	12
I.2. Lidércudvar (<i>sprite halo</i>)	16
I.3. Gyűrűlidérc (<i>ELVES</i>)	18
I.4. Kék nyalábok (<i>blue jet, blue starter</i>) és óriás nyaláb (<i>gigantic jet</i>)	19
I.5. Egyéb felsőlégtöri elektro-optikai emissziók	21
II. A FEOE-k forrásvillámainak töltésmomentum-változása	22
II.1. A töltésmomentum-változás meghatározásának módszerei villámkisülések esetében	23
II.2. A villámkisülések elektromágneses sugárzása - atmoszferikék (<i>atmospherics</i>)	25
II.3. ELF atmoszferikék és Schumann-rezonancia tranziensek (<i>SRT-ek</i>)	27
II.4. A SRT-ek és a FEOE-k forrásvillámainak kapcsolata	32
II.5. Vertikális elektromos dipólusforrás (távoli) sugárzási tere a Föld-ionoszféra hullámvezetőben	34
II.6. A FEOE-k forrásvillámainak ELF-VLF észlelések alapján meghatározott töltésmomentum-változása	41
III. SRT-ek regisztrálása és feldolgozása a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban	45
III.1. Mérőrendszer és adatrögzítés	45
III.2. Hitelesítés	49
III.3. Az adatgyűjtő által rögzített adatok megjelenítése	50
III.4. SRT jelek felismerése a kvázi-folytonos adatsorokban	51
III.5. Nyers regisztrátumok előkészítése a további elemzéshez	57
III.6. A forrás polaritásának meghatározása	61
III.7. A forrás irányának meghatározása	61

III.8. A forrás távolságának meghatározása	63
III.9. A forrás vertikális árammomentum-spektrumának és töltésmomentum- változásának meghatározása	69
IV. A nappali-éjszakai terminátorvonalhoz viszonyított forrás-észlelő geometria szerepe a SRT-ekből levezetett árammomentum-spektrumok amplitúdójánál.....	74
IV.1. Motiváció és kutatási előzmények.....	74
IV.2. Mérőállomások és a SRT-ek kiválasztása	77
IV.3. A különböző mérőállomások adataiból meghatározott forrásárammomentum- spektrumok összehasonlítása	81
V. FEOE forrásvillámok Sopron mellett észlelt SRT-ekből levezetett töltésmomentumai	86
V.1. Az EuroSprite 2003 megfigyelési kampány.....	87
V.2. Az EuroSprite 2005 megfigyelési kampány.....	87
V.3. FEOE megfigyelések kelet-mediterrán téli zivatarok fölött Izraelből 2005 és 2009 között.....	88
V.4. FEOE észlelések Afrika fölött.....	90
V.5. Lidércudvar észlelések a FORMOSAT-2 műholdról 2004-2007.....	92
V.6. Következtetések.....	94
VI. Felsőlégtörési optikai megfigyelőrendszer felállítása Sopronban.....	96
VI.1. Motiváció.....	96
VI.2. Eszközpark.....	97
VI.3. A megfigyelés módszere és az eszközök beállításai	101
VII. Közép-európai FEOE-k néhány tulajdonsága soproni észlelések alapján	104
VII.1. Optikai észlelések 2007-ben.....	104
VII.2. Új FEOE típus megfigyelése.....	108
VII.3. Az emissziókat kiváltó villámkisülések azonosítása	111
VII.4. A forráskisülések és az optikai emissziók megjelenése közötti időkülönbség...	113
VII.5. A vörös lidérc alakja és megjelenésük forráskisüléstől számított időeltolódása.....	115
VII.6. Az emissziókat kiváltó villámkisülések csúcsáramértékei	117
VII.7. FEOE-kat kiváltó és nem kiváltó villámkisülések összehasonlítása a csúcsáramértékek alapján	119

<i>VII.8. FEOE-kat kiváltó és nem kiváltó villámkisülések összehasonlítása a felhővillámok magassága alapján.....</i>	<i>121</i>
VIII. Vörös lidércek tulajdonságainak vizsgálata két megfigyelőhelyről történő egyidejű optikai észlelések alapján.....	123
<i>VIII.1. Motiváció és kutatási előzmények.....</i>	<i>123</i>
<i>VIII.2. Forrásadatok és a háromszögelés módszere.....</i>	<i>124</i>
<i>VIII.3. A vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány.....</i>	<i>129</i>
<i>VIII.4. A vörös lidércek és keltővillámaik horizontális eltolódása.....</i>	<i>132</i>
<i>VIII.5. Vörös lidércek konfigurációja csoportos megjelenés esetén.....</i>	<i>133</i>
Összefoglalás	138
A tárgyalt témák további vizsgálatának néhány lehetséges iránya	144
További köszönetnyilvánítás.....	145
Ábrák jegyzéke.....	146
Irodalomjegyzék.....	150
Internetes hivatkozások	168

A dolgoztában előforduló rövidítések

A/D	<u>A</u> nalóg \Rightarrow <u>D</u> igitális (átalakító)
AGO	<u>A</u> stronomical and <u>G</u> eophysical <u>O</u> bservatory (Modra, Szlovákia)
CCD	a fényt elektronikus jelekké alakító töltés-csatolt eszköz (<u>C</u> harge- <u>C</u> oupled <u>D</u> evice)
CCIR	monokróm analóg televíziós képkódolási rendszer, amely például Európa nagy részén és Ausztráliában elfogadott (<u>C</u> ommittee <u>C</u> onsultatif <u>I</u> nternational <u>R</u> adiotelecommunique)
CG	Felhő-föld villámkisülés (<u>C</u> loud to <u>G</u> round)
DC	egyenáram (<u>D</u> irect <u>C</u> urrent)
EIA	monokróm analóg televíziós képkódolási rendszer, amely például az USA-ban, Kanadában és Japánban elfogadott (<u>E</u> lectronics <u>I</u> ndustry <u>A</u> ssociation)
ELF	extrém alacsony frekvencia (<u>E</u> xtremely <u>L</u> ow <u>F</u> requency, 3-3000 Hz)

ELVES	gyűrűlidérc, FEOE típus, (<u>E</u> missions of <u>L</u> ight and <u>V</u> ery <u>L</u> ow <u>F</u> requency <u>P</u> erturbations <u>F</u> rom <u>E</u> lectromagnetic <u>P</u> ulse <u>S</u> ources)
EM	<u>E</u> lektro <u>M</u> ágnes(es)
EOSO	zivatarok hanyatló szakaszában az elektromos tér irányának váltakozása (<u>E</u> nd <u>O</u> f <u>S</u> torm <u>O</u> scillation)
EUCLID	európai villámfigyelő hálózat (<u>E</u> uropean <u>C</u> ooperation for <u>L</u> ightning <u>D</u> etection)
FEOE	<u>F</u> elsőlévköri <u>E</u> lektro- <u>O</u> ptikai <u>E</u> misszió
GPS	globális műholdas helymeghatározó rendszer, időszinkronzálásra is alkalmazható (<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem)
GYSEV	<u>G</u> yőr- <u>S</u> opron- <u>E</u> benfurti <u>V</u> asút Zrt.
HSI	nagysebességű fényképezési technika (<u>H</u> igh <u>S</u> peed <u>I</u> maging)
IC	felhővillám (felhők közötti vagy felhőn belüli– <u>I</u> nter/ <u>I</u> ntra <u>C</u> loud)
IR	infravörös (<u>I</u> nfra <u>R</u> ed)
ISO	Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (<u>I</u> nternational <u>O</u> rganization for <u>S</u> tandardization)
ISUAL	a FORMOSAT-2 műhold FEOE megfigyelőegysége (<u>I</u> mager for <u>S</u> prites and <u>U</u> pper <u>A</u> tmospheric <u>L</u> ightning)
LF	alacsony frekvencia (<u>L</u> ow <u>F</u> requency, 30-300 kHz)
LINET	európai villámfigyelő hálózat (<u>L</u> ightning detection <u>N</u> ETwork)
MCS	mezoskálájú konvekciós rendszer (<u>M</u> esoscale <u>C</u> onvective <u>S</u> ystem)
MR	izraeli Schumann-rezonancia mérőállomás <u>M</u> itzpe <u>R</u> amon város mellett, néhány helyen a fényesség mértékegysége <u>M</u> ega- <u>R</u> ayleigh
NCK	a Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium hárombetűs azonosítója
NLDN	az Egyesült Államok villámfigyelő hálózata (<u>N</u> ational <u>L</u> ightning <u>D</u> etection <u>N</u> etwork)
NTSC	analóg színtelevíziós képkódolási rendszer, amely például az USA-ban, Kanadában és Japánban elfogadott (<u>N</u> ational <u>T</u> elevision <u>S</u> ystems <u>C</u> ommittee)
OMSZ	<u>O</u> rszágos <u>M</u> eteorológiai <u>S</u> zolgálat
OTD	műholdon alkalmazott villámészlelő egység (<u>O</u> ptical <u>T</u> ransient <u>D</u> etector)

PAL	analóg színtelevíziós képkódolási rendszer, amely például Európa nagy részén és Ausztráliában elfogadott (<u>P</u> hase <u>A</u> lternate <u>L</u> ine)
PC	személyi számítógép (<u>P</u> ersonal <u>C</u> omputer)
SAFIR	VHF sávú villámészlelésben alkalmazott interferometrikus érzékelő típus (<u>S</u> urveillance et <u>A</u> lerte <u>F</u> oudre par <u>I</u> nterférometrie <u>R</u> adioélectrique)
SR, SRT	<u>S</u> chumann- <u>R</u> ezonancia, <u>S</u> chumann- <u>R</u> ezonancia <u>T</u> ranziens
STEPS	Észak-Amerikában folytatott zivatarmegfigyelési kampány (<u>S</u> evere <u>S</u> torm <u>E</u> lectrification and <u>P</u> recipitation <u>S</u> tudy)
TE, TM	<u>T</u> ranszverzális <u>E</u> lektromos, <u>T</u> ranszverzális <u>M</u> ágneses
TEM, Q-TEM	(kvázi - <u>Q</u> uasi) <u>T</u> ranszverzális <u>E</u> lektro <u>M</u> ágneses
TIGER	a dolgozatban FEOE típus (<u>T</u> ransient <u>I</u> onospheric <u>G</u> low <u>E</u> mission in <u>R</u> ed)
TROLL	a dolgozatban FEOE típus (<u>T</u> ransient <u>R</u> ed <u>O</u> ptical <u>L</u> uminous <u>L</u> ineament)
UTC	világidő, az angol „ <u>C</u> oordinated <u>U</u> niversal <u>T</u> ime” és a francia „ <u>T</u> empse <u>U</u> niversel <u>C</u> oordonné” összevonásából
VHF	nagyon magas frekvencia (<u>V</u> ery <u>H</u> igh <u>F</u> requency, 30-300 MHz)
VLF	nagyon alacsony frekvencia (<u>V</u> ery <u>L</u> ow <u>F</u> requency, 3-30 kHz)

Bevezetés

Mikro- és makrokörnyezetünk nem minden eleme van közvetlen, illetve azonnal érezhető hatással az életünkre. A természet megismerése azonban arra tanít, hogy a bennünket körülvevő világban az egymástól nagyon távolinak tűnő összetevők változásai között is létezhet kapcsolat. Miközben fennmaradásunk, vagy akár csak életünk megkönnyítése érdekében globálisan számottevő mértékben megváltoztatjuk környezetünk elemeit, létfontosságú, hogy közben tudatában legyünk beavatkozásaink következményeinek. Távolról sem állíthatjuk, hogy jelenlegi tudásunk alapján a természet bonyolult összefüggésrendszerét átlátjuk, ezért a természettudományos kutatásnak minden területen létjogosultsága van.

A légköri elektromosság környezetünk egyik háttéreleme, hiszen közvetlen kapcsolata a mindennapi életünkkel a villámkisülések révén alkalomszerű. E természeti összetevő azonban viszonylag egyszerű és gazdaságos lehetőséget nyújt mindazon folyamatok nyomkövetésére és megismerésére, amelyekkel a kapcsolatát ismerjük. Erre a legszélesebb körben ismert példa a zivatarkevényesség megfigyelése és előrejelzése a villámkisülések elektromágneses jeleinek észlelése alapján.

A troposzférikus villámok közeli rokonainak tekinthető felsőléggöri elektro-optikai emissziók a légköri elektromosságnak újabban, csak a XX. század végén felfedezett megnyilvánulási formái. Létük a zivatarok és a földkörüli térség szabad elektronokat jelentősebb koncentrációban tartalmazó rétege, az ionoszféra közötti közvetlen kapcsolat létezésének bizonyítéka. Helyzetükből adódóan ezeknek az emisszióknak a megfigyelése, kialakulásuknak és fizikai tulajdonságaiknak a megismerése nemcsak a zivatarok szerkezetének feltérképezéséhez és a töltésszétválasztó folyamatok teljesebb megértéséhez járul hozzá, hanem az ionoszféra alsó határrétegének változásaira és dinamikai jellemzőire is rávilágít. Ezeknek a jelenségeknek a többsége a légkör egyik legkevésbé ismert rétegében, az 50-100 km-es magasságtartományban alakul ki. A légkör itt egyrészt nem elég sűrű, hogy repülőgépek vagy akár mérőballonok számára megfelelő felhajtóerő léphessen fel, másrészt ilyen alacsonyan műholdak pályáraállítása sem lehetséges a számottevő súrlódási fékezés miatt. Az elektro-optikai emissziók vizsgálata így a közvetlen, ám költséges rakétamérések egyszerű és kis beruházást igénylő alternatíváját jelentheti a felsőléggör megismerésében.

A jelenséggör tanulmányozásának igénye nemcsak a felsőléggört, az ionoszférát és a zivatarkevényességet érintő ismeretek bővítésében játszik szerepet, hanem számos olyan kutatási területen is aktivitást generált, amely nem feltétlenül áll közvetlen kapcsolatban

magukkal az emissziókkal, a megismerésüket azonban elősegítheti. Ilyen terület például a villámkisülésektől származó elektromágneses hullámok terjedésének vizsgálata a Föld-ionoszféra hullámvezetőben, vagy a légköri gravitációs hullámok tulajdonságainak a kutatása. Az elektro-optikai emissziókkal kapcsolatos kérdések megválaszolása céljából ezeken a területeken végzett tudományos kutatómunka eredményei azonban ugyanúgy hozzájárulnak a különböző természeti folyamatok és a légköri elektromosság összefüggésrendszerének megismeréséhez, mint annak a feltárása, hogy maguknak az emisszióknak a vizsgálata milyen információval gyarapíthatja a tágabb környezetünkkel kapcsolatos ismereteinket.

Ebben a dolgozatban a felsőlégköri elektro-optikai emissziók jellemzőinek a tanulmányozása mellett a természetes eredetű alacsonyfrekvenciás elektromágneses hullámok vizsgálatával igyekszem hozzájárulni a villámkisülések és a Föld-ionoszféra hullámvezető közötti kölcsönhatásrendszer megismeréséhez.

A dolgozat témája és célkitűzései

A felsőlégköri elektro-optikai emissziók (FEOE-k) csoportját a zivatarfelhők és az ionoszféra alsó határrétege között kialakuló különböző gázkisülési jelenségek alkotják. Ezeknek az emisszióknak az élettartama, morfológiai és dinamikai tulajdonságai széles határok között változnak és karakterisztikusan különböznek a troposzférikus villámkisülések megfelelő jellemzőitől. A felsőlégkörben a légsűrűség nagyságrendekkel alacsonyabb és a kisülések inicializációjának mechanizmusa is eltérő. A FEOE-k egy része intenzív felhő-föld villámkisülések után a felhőben maradt másik töltéscentrum és az ionoszféra között felépülő és rövid ideig fennálló elektromos térben alakul ki. Az ilyen esetekben az emisszió megjelenését kiváltó kvázi-stacionárius elektromos tér erősségére a tér létrejöttét okozó forrásvillám töltésmomentum-változásából következtetni lehet.

A villámkisülések töltésmomentum-változása a kisülés közben kisugárzott elektromágneses hullámok jeleinek analízise alapján becsülhető. A Schumann-rezonancia tranziensek (SRT-ek) egyedi, intenzív villámkisülésektől származó nagy energiájú hullámcsomagok, amelyek a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjednek és energiájuk a zárt hullámvezető első (alsó) néhány elektromágneses sajátrezgésének a frekvenciatartományában koncentrálódik. Emiatt ezek a hullámcsomagok a Föld-ionoszféra rendszernek mint üregrezonátornak az átmeneti gerjesztéseiként is felfoghatók. A SRT-ek mérőállomásokon regisztrált adatsoraiból a forrásvillám polaritása, földrajzi helye és vertikális árammomentuma

levezethető, ez utóbbiból pedig a töltésmomentum-változás meghatározható. Tekintve, hogy a FEOE-k egy tekintélyes hányadát kiváltó intenzív villámkisülések egyúttal SRT források is, a SRT-ek FEOE kutatásban való alkalmazása kézenfekvő.

Első feladatomban a Sopron mellett, Nagycenk, illetve Fertőboz közelében felállított Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő mérőrendszer által rögzített SRT idősorok feldolgozása és a tranziensek forrásvillámjainak a levezethető paraméterekkel való jellemzése volt. A jelsorok analízisének az adatok előkészítésében és a feldolgozás során ismert eljárásokat alkalmaztam, azonban ezeket a mérőrendszer egyedi tulajdonságaira tekintettel több helyen szükséges volt módosítani, valamint kiegészíteni.

Az analízis módszerének kidolgozását és implementálását követően megvizsgáltam, hogy a SRT-ekből levezetett forrásjellemzők közül az árammomentumot mennyire befolyásolja, hogy a SRT észlelése nappal vagy éjszaka történt, illetve hogy a forráskisülés a nappali vagy az éjszakai féltekén következett be.

Ezután FEOE-kat kiváltó villámkisülések paramétereit határoztam meg és összevettem Európa különböző régiói felett, valamint más kontinensek felett észlelt különböző emissziók forrásainak töltésmomentum-változásait.

Más kutatócsoportok tapasztalatait felhasználva megterveztem és felállítottam egy optikai megfigyelőrendszert Sopronban, amellyel a LINET villámfigyelő-hálózattal együttműködve FEOE észleléseket folytattam Közép-Európában 2007-ben és az azt követő években. A 2007-es megfigyelések alapján meghatároztam a régióban a FEOE-k néhány jellemző tulajdonságát: a forráskisülések és az optikai emissziók megjelenése közötti időbeli és térbeli eltolódások eloszlását, az emissziók kiterjedését, csoportos megjelenés esetén az elemek konfigurációját. Ahol ez lehetséges volt, a tulajdonságokat a felsőlégi körülmények típusa, illetve az emisszió morfológiai tulajdonságai szerint külön is megvizsgáltam, és összehasonlítottam más kontinensek és régiók fölött észlelt hasonló jelenségek jellemzőivel.

A dolgozatban először röviden ismertetem a FEOE-k fő jellemzőit (I. fejezet), majd a villámkisülésekhez köthető felsőlégi körülmények kialakulásának szempontjából kiemelkedően fontos paraméternek, a forráskisülés töltésmomentum-változásának a szerepét és meghatározásának a lehetőségeit taglalom (II. fejezet bevezetése és II.1. fejezet). A villámkisülések elektromágneses sugárzásának a töltésmomentum-változás meghatározásának szempontjából fontos sajátosságairól a II.2. fejezetben esik szó. Ezután részletezem a SRT-ek fő jellemzőit és rávilágítok a FEOE forrásvillámokkal való kapcsolatukra (II.3-II.4. fejezet). A SRT-ek spektrumának egy széles körben alkalmazott elméleti leírását, amely a móduselmélet eszközeit használó levezetésen alapul, a II.5. fejezetben közlöm. Végül a II.6. fejezetben a

villámkisülésekhez kapcsolható FEOE-k forrásvillámainak töltésmomentum-változásaira vonatkozó korábbi vizsgálatok eredményeit foglalom össze.

Ezután mutatom be a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő Schumann-rezonancia mérőrendszer felépítését és működését, valamint az észlelőantennák hitelesítésének menetét (III.1-III.2. fejezet). Az III.3-tól a III.9. fejezetig tartó szakaszban részletezem az adatsorok előkészítésének, illetve a különböző forrásparaméterek levezetésének általam is alkalmazott lépéseit. A IV. fejezet tartalmazza a nappali-éjszakai aszimmetria hatásának vizsgálatát célzó eljárás leírását, valamint a kapott eredményeket.

Az V. fejezetben található az Európa különböző régiói és Afrika felett észlelt FEOE-k forrásaihoz tartozó, saját SRT észlelésekből levezetett töltésmomentum-értékek, valamint ezek eloszlásának bemutatása, illetve az eloszlások tulajdonságainak összevetése más kutatócsoportok tapasztalataival.

A VI. fejezet bemutatja a Sopronban felállított optikai megfigyelőrendszer részeit és ismerteti a megfigyelések végzésének módszertanát. A VII. és a VIII. fejezetben részletesen tárgyalom a 2007-es közép-európai optikai észleléseink feldolgozása alapján született eredményeket. Elemzem az emissziók tulajdonságainak a forráskisülés villámfigyelő-hálózatból származó hely, csúcsáram, illetve felhővillámok esetén magasság adataival való lehetséges összefüggéseit, valamint a kapott eredményeket más kutatócsoportok által publikált eredményekkel vetem össze. A VII. fejezet ezek közül azokat a következtetéseket foglalja össze, amelyeket egyedül a soproni megfigyelések alapján is le lehetett vonni. Amíg itt túlnyomó részben csak a 2007-es megfigyelések eredményei szerepelnek, a VII.2. fejezetben beszámolok egy ismereteim szerint eddig nem dokumentált FEOE típus megfigyeléséről, amelyet 2009 augusztusában rögzítettem. Végül a VIII. fejezetben található azok eredmények, amelyek olyan Közép-Európa fölött megfigyelt FEOE-kat érintő vizsgálatokból származnak, amelyeket egyidejűleg figyeltünk meg Sopronból és egy szlovákiai észlelőállomásról.

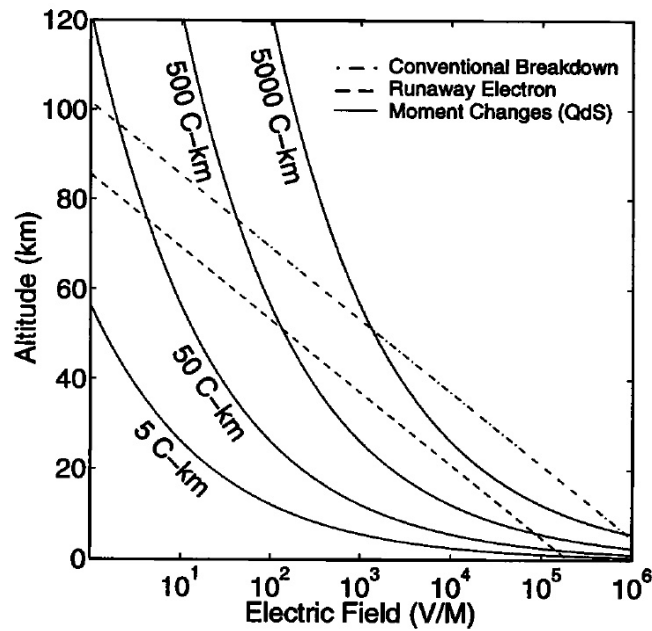
I. Felsőlégi elektromos emissziók (FEOE-k)

A meteorológiai értelemben vett felsőlégi körben, azaz a kb. 20 - 100 km-es magasságtartományban több, régóta ismert optikai emisszó keletkezik. Az égbolttűny (airglow) a légkör fotoionizáció vagy kozmikus részecskékkel való ütközés hatására gerjesztett és disszociált különböző alkotóinak rekombinációs, illetve kémiai reakció közbeni kemilumineszcenciás, relaxációs sugárzása, amelynek intenzitásmaximuma 90-100 km-es magasságban található [Khomich et al., 2008]. Az aurora legalsó tartománya, amely a geomágneses tér által eltérített napszél hatására ionizálódott és gerjesztett oxigén és nitrogén atomok relaxációja során válik láthatóvá, szintén ebben a magasságban helyezkedik el [Bone, 2007]. A légkörbe érkező nagyobb meteoritikus testek is ebben a rétegben égnek teljesen el [Lindblad, 1968]. Ezen optikai emissziók egyike sincs azonban közvetlen kapcsolatban a légköri elektromossággal.

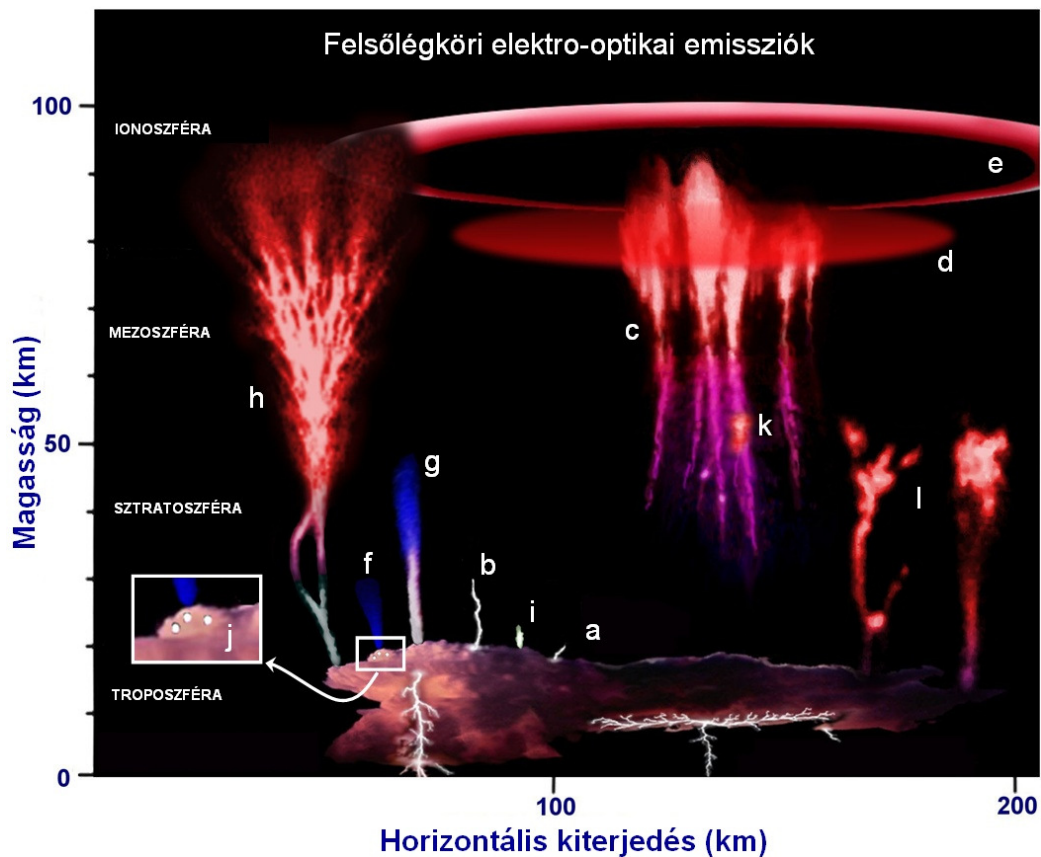
A légköri elektromosság elsődleges forrásai a zivatarfelhőkben működő töltésszétválasztási folyamatok. A zivatargócokban szétválasztott töltések szerepe kulcsfontosságú a földfelszín és az ionoszféra 60-90 km-es magasságban húzódó alsó határrétege közötti kb. 250-300 kV potenciálkülönbség fenntartásában [Rycroft et al., 2008], amely zivatarok hiányában a nem tökéletesen szigetelő levegőben a két vezető felület között folyó gyenge áram miatt lassan kiegyenlítődne. Amíg a zivatarfelhők elektromos kapcsolata a földdel a felhő-föld villámkisülések révén régóta ismert, az ionoszférával való direkt kapcsolat létezése sokáig nem volt ilyen nyilvánvaló. A zivatarfelhők tetejéről (10-20 km) felfelé irányuló, az átlagos villámokhoz hasonló kisülések jellemzően néhány km hosszúságúak (2.a és 2.b ábra, a következő oldalon) [Vonnegut et al., 1989; Wescott et al., 1995; Lyons et al., 2003a], míg az ionoszféra alsó határa 60-90 km magasan húzódik.

Wilson 1925-ben elsőként vetette fel, hogy közvetlenül nagy töltésmomentumú villámok után a felhőben maradt töltések és az ionoszféra között rövid ideig fennálló elektromos tér erőssége 60-80 km-es magasságban meghaladhatja az elektromos kisülés bekövetkezéséhez szükséges kritikus értéket [Wilson, 1925] (1. ábra, a következő oldalon).

Az elméletet igazoló első hiteles megfigyelésre csak 1989-ben, egy emelt érzékenységű kamera tesztelése közben, véletlenül került sor [Franz et al., 1990] annak ellenére, hogy egészen a XIX. sz. végétől találhatók leírások, amelyekben nagy magasságokban megjelenő, az utóbbi megfigyelésekkel összhangban álló felvillanásokat em-



1. ábra: Villámkisülés után kialakuló kvázi-stacionárius elektromos tér (Electric field) legnagyobb térerőssége különböző magasságban (Altitude). A folytonos vonalak más-más töltésmomentumú villámkisüléshez tartozó görbéket jelölnek. Pont-szagatott vonallal a klasszikus kisülés (Conventional Air Breakdown) kritikus térerősségét, szaggatott vonallal az elszabadult elektronlavinák (Runaway Electron Breakdown) kialakulásához szükséges kritikus térerősséget ábrázolták a különböző magasságokban. [Huang et al., 1999, Figure 2.]



2. ábra: A felsőlégtéri elektro-optikai emissziók ismert típusai. **a)** közönséges felfelé irányuló villámkisülés (upward flash); **b)** felfelé irányuló óriás kisülés (upward superbolt); **c)** vörös lidérc (sprite); **d)** lidércudvar (sprite halo); **e)** gyűrűlidérc (ELVES); **f)** kis kék nyaláb (blue starter); **g)** kék nyaláb (blue jet); **h)** óriás nyaláb (gigantic jet); **i)** törpe (gnome); **j)** tündérek (pixies); **k)** TROLL; **l)** pálma lidércek (palm trees). Az ábra alapjául [Lyons et al., 2003a, Fig.1.] szolgált.

litenek [Lyons, 2006]. A „hivatalos” felfedezést követően megélénkült a tudományos érdeklődés a meteorológiai értelemben vett felsőlégkör iránt. A földfelszínről, repülőgépről, ballonokról és a világűrben történt számos észlelés során a felsőlégköri elektro-optikai emissziók (az angol nyelvű szakirodalomban transient luminous events - TLEs) különböző típusait figyelték meg (2. ábra, az előző oldalon). Ezek a jelenség kialakulásának eredetét tekintve három fő csoportba sorolhatók. A továbbiakban csoportonként haladva röviden áttekintem a különböző jelenségtípusok főbb jellemzőit. A tulajdonságok részletesebb, összefoglaló tárgyalása a következő tanulmányokban található [Rakov és Uman, 2003, 14. fejezet; Lyons, 2006; Pasko, 2006; Mika, 2007; Neubert et al., 2008].

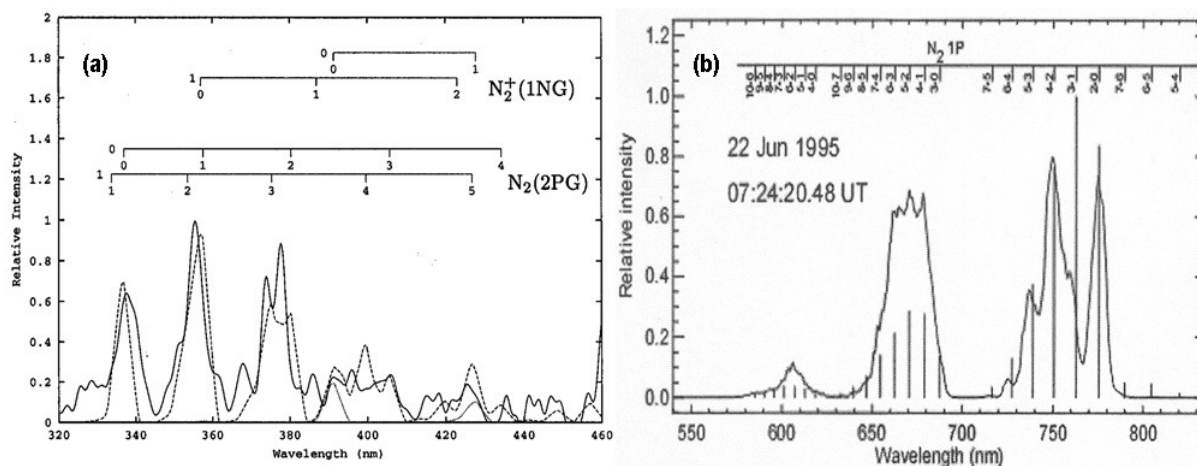
1.1. Vörös lidérc (red sprite)

A nagyobb töltésmomentumú villámkisülések után a zivatarfelhő és az ionoszféra közötti kvázi-stacionárius térben kialakuló kisülési folyamatok leglátványosabb formája a vörös lidérc (red sprite) (2.c ábra, az előző oldalon). A vörös lidércek keletkezését és leglényegesebb tulajdonságait (megjelenési magasság és néhány alapvető forma) nagy léptékben klasszikus kisülések (conventional breakdown) [Pasko, 2006], illetve elszabadult elektronlavinák (runaway breakdown – két ütközés között az elektron nagyobb energiát nyer a külső tértől, mint amennyit az ütközés során elveszít) [Yukhimuk et al., 1998] jellemzőit figyelembe véve sikerült modellezni, ugyanakkor számos megfigyelés értelmezése tisztázásra vár. Ezek közül néhányra a következőkben kitérek.

A vörös lidércek Wilson elképzelésével összhangban 60-80 km-es magasságban alakulnak ki és lefelé, illetve felfelé is terjeszkedhetnek. A mindkét irányban kiterjedt alakzatok kitölthetik a 45-90 km-es magasságtartományt és extrém esetben egészen a felhőtetőig is leérhetnek [Siefiring et al., 1999]. Megjelenhetnek egymagukban vagy csoportosan, utóbbi esetben a csoport elemei horizontálisan akár 50 km-es átmérőjű tartományt is elfoglalhatnak. Küllemük az egyszerű oszloptól a répára részletekbe menően hasonlító formáig (hajszálgyökök, répatest, szár és levélzet) több különböző alakot ölthet (pl. gondolócsont ('V'), fa, angyal/madár, medúza, stb.). A lefelé terjedő, gyakran elágazó szálokon néha lokalizált kifényesedések (gyöngyök - beads) figyelhetők meg. A vörös lidérceket a kvázi-stacionárius tér fennállása alatt (az exponenciális lecsengés időállandója ~ 1 ms 80 km-en és ~ 15 ms 50 km-en) kialakuló és gyorsan mozgó kisülési frontok „rajzolják” az égre és csak az ehhez képest hosszabb exponálási idejű video képkockákon (PAL/CCIR

szabvány, pl. Európa nagy részén: 20 ms, NTSC/EIA szabvány, pl. az USA-ban és Japánban: 16 2/3 ms váltott soros expozíció esetén) jelennek meg mint alakzatok. A jelenség központi része azonban néhány képkockányi időtartam erejéig még látható maradhat kisülési utófolyamatok következtében, amelyek eredete (kémiai vagy elektromos) egyelőre nem teljesen tisztázott.

A vörös lidércok optikai emissziója főleg a 600-800 nm-es spektrális tartományban jelentős (3.b ábra). A szabad elektronok és a semleges nitrogénmolekulák ütközései által gerjesztett $N_2(1P)$ gerjesztési állapot relaxációs sorozata 640 nm és 690 nm között, valamint 750 és 775 nm környékén sugároz intenzíven. Ezek a gerjesztési típusok 50 km-es magasság fölött dominánsak és a jelenség vörös színét okozzák a látható és a közeli infravörös (infra red - IR) színek tartományban. A 450 nm alatti sávban kibocsátott sugárzás (3.a ábra) 50 km alatt egyre több kékkel járul hozzá a jelenség színárnyalatához. Ez az összetevő főleg a N_2^+ ionok szabad elektronok általi ütközéses gerjesztésének relaxációjából fakad, és a légkörben nagyobb Rayleigh szórás miatt távolabbról általában nehezebben észlelhető. A legfényesebb vörös lidércok sugárzása többször 10 MR és néhány tized MR között változik, de rövid időskálán elérheti az $5 \cdot 10^5$ MR-t is [Stenbaek-Nielsen et al., 2007]. (1 MR = 10^6 R, 1R = 1 Rayleigh = 10^{10} olyan foton, amely az észlelés irányában végtelen, 1 m² keresztmetszetű oszlopban keletkezett és az oszlop keresztmetszetén az észlelő felé 1s alatt kilépett. Az éjszakai égbolt sugárzása pl. kb. 250 R.)



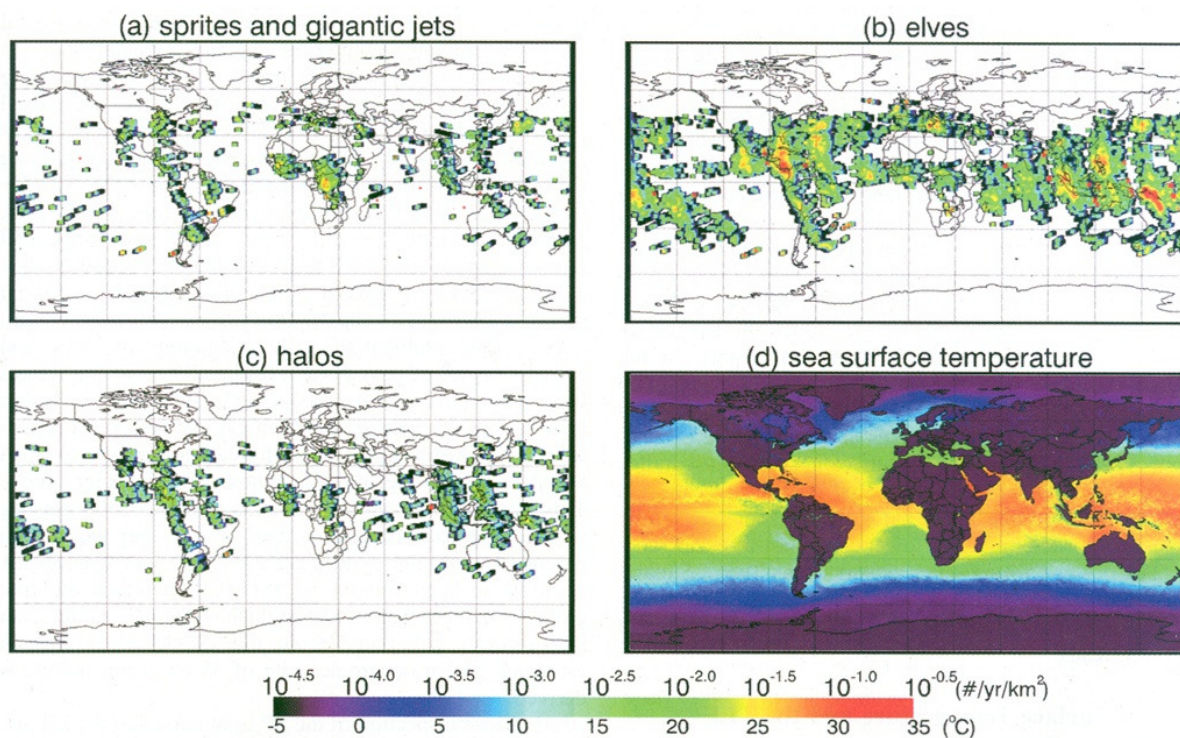
3. ábra: Vörös lidérc mért spektrumainak relatív intenzitásai (relative intensity) a hullámhossz (wavelength) függvényében. **a)** Az ábra felső részén a N_2 molekula 2P gerjesztésének és az N_2^+ ion 1N gerjesztésének a relaxációs sorozatához tartozó hullámhosszakat jelölték. A folytonos vonal a mért spektrum, a szaggatott vonal modellszámítás eredménye [Heavner, 2000, Figure 3.8]. **b)** Az ábra felső részén a N_2 molekula 1P gerjesztésének relaxációs sorozatához tartozó hullámhosszak láthatók, a függőleges vonalak az auróra elektronbecsapódások (electron precipitation) következtében várható emisszióinak modellezett intenzitását mutatják [Hampton et al., 1996, Figure 3].

A vörös lidércek általában nagy töltésmomentumú, túlnyomórészt pozitív polaritású felhő-föld villámkisülések után jelennek meg, bár néhány felhővillámhoz, illetve nagyon ritkán egy-egy negatív polaritású villámkisüléshez köthető megfigyelés is történt és az utóbbi megfigyelések a felhővillámok jelentősebb szerepét sejtetik az emisszió kiváltásában [Neubert et al., 2008]. (A villám polaritását felhő-föld kisülés esetén a felhőben kisülő töltéscentrum töltésének előjele, felhővillámoknál megegyezés szerint a magasabban elhelyezkedő töltéscentrum töltésének az előjele határozza meg.) A negatív polaritású villámokkal, illetve a felhővillámokkal összevetve a pozitív felhő-föld kisülésekre jellemző a fővillám utáni fennmaradó áram (continuing current) kialakulása [Uman, 1987, 11.5 fejezet] (25. oldal, 5. ábra). A fennmaradó áram időtartama alatt a kritikus térerősség eléréséhez szükséges töltésmennyiség átáramolhat a kisülési csatornán és kellő ideig biztosítani tudja a megfelelő nagyságú kvázi-stacionárius elektromos tér fennmaradását a kisülési frontok kialakulásához. A vörös lidércek megjelenésének az időpontja a kritikus térerősség elérésének az idejétől függ a felsőlégkörben, ezért az optikai észlelési idő a kiváltó kisülés fővillámától akár 200 ms-mal is el lehet tolódva. A lidércek az őket kiváltó kisüléshez képest nemcsak időben, hanem térben is, horizontálisan akár néhányszor 10 km-rel eltolódva alakulhatnak ki, amire egyelőre nem sikerült kielégítő magyarázatot találni. Az eddig felmerült lehetőségek között szerepelnek természetes légköri sűrűségingadozások, a kisülő és a felhőben maradó töltéscentrumok egymáshoz viszonyított eltolódása, gravitációs hullámok interferenciája, a keletkezést beindító szabad elektronok létrejötte galaktikus kozmikus részecskék ütközési ionizációjából és meteoroktól származó fémionok katalitikus hatása.

A vörös lidércek globális előfordulási gyakorisága műholdas mérések alapján percenként átlagosan 0.5-1 eseményre tehető. Többségükben szárazföldek fölött, az aktív zivataros területeken fordulnak elő, de tengerek és óceánok fölött való megjelenésük sem szokatlan (4.a ábra, a következő oldalon) [Chen et al., 2008; Hsu et al., 2009]. Leggyakrabban a zivatarok érett fázisát követő hanyatló fázisban jelennek meg, amikor a felszín közelében a légköri vertikális elektromos tér egyenáramú (DC) komponense akár többször előjelet vált (EOSO – End Of Storm Oscillation). A zivatarok vörös lidérceket keltő potenciálja különböző. Kvantitatív eredmények nem állnak rendelkezésre, de a tapasztalatok szerint a zivatar „lidérc aktivitása” függ a zivatarfelhő kiterjedtségétől, a töltésszétválasztás hatékonyságát befolyásoló tényezőktől (pl. felhő hőmérsékleti profilja, feláramlás sebessége) és a légköri aeroszol koncentrációtól [Lyons et al., 1998]. Egy átlagos zivatar fölött néhány-több tíz esemény figyelhető meg a zivatar teljes élettartama alatt, de ritkán előfordul, hogy egyetlen

kiterjedt zivatarrendszer fölött több száz jelenséget is sikerül lencsevégre kapni [Thomas et al., 2007].

A vörös lidércek indirekt észlelését segítheti, hogy Farges és munkatársai erre a FEOE típusra jellemző infrahang mintázatot találtak kb. 6 Hz alatt a megfigyelési időszakban az észlelőrendszerük kb. 1000 km-es körzetében az optikailag megfigyelt emissziók 70%-ának esetében. Azt is megfigyelték, hogy az infrahang struktúra időtartama az emissziók horizontális kiterjedésére utal [Neubert et al., 2005; Farges és Blanc, 2010].



4. ábra: FEOE-k globális előfordulási gyakorisága a FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegységének 2004 júliusa és 2007 júniusa közötti észlelései alapján. A színskála a (d) ábra esetében hőmérsékletet, az (a)-(c) ábrák esetében gyakoriságot jelez db/év/km² mértékkel. **(a)** vörös lidércek előfordulási gyakorisága és óriás nyálábok megfigyelési helyei (piros ponttal jelölve), **(b)** gyűrűlidércek előfordulási gyakorisága, **(c)** lidércudvarok előfordulási gyakorisága, **(d)** közepes tengerfelszíni hőmérséklet 2004 júliusa és 2005 decembere között. [Chen et al., 2008, Figure 3.]

Bár a vörös lidérc nem a leggyakoribb FEOE típus, magas fényességük és a gyakoribb emissziótípusokhoz mérten hosszabb élettartamuk miatt velük kapcsolatban merült fel a semleges légkör kémiai összetételére gyakorolt hatásuk kérdése. Winands vizsgálatai alapján a kisülési frontokban az elektromos energia jó hatásfokkal (akár 50%-ban is) fordítódhat főleg O₃, NO_x, atomos H, N és negatív ionok képződésére [Winands, 2007]. Globális léptékben ugyan nem találtak egyértelműen a vörös lidérceknek és általában a FEOE-knak tulajdonítható koncentrációnövekedést (legalábbis a nitrogén-oxidokat illetően) [Enell et al., 2008; Rodger et al., 2008], azonban egy-egy intenzív, számos vörös lidércet keltő zivatar

fölött több 10%-os NO_x többlet volt tapasztalható [Arnone et al., 2009], ami e jelenség lokálisan szignifikáns kémiai hatására utal.

A vörös lidércek testében fellépő elektrontöbblet és az átfolyó áram, valamint a jelenség által az ionoszféra alján okozott ionoszférikus irregularitás módosítja az arra haladó VLF (Very Low Frequency - nagyon alacsony frekvencia, 3-30 kHz) sávú hullámok irányát, amplitúdóját és fázisát [Rodger és McCormick, 2006; Mika, 2007]. Az ennek következtében megjelenő jeltorzulást nevezik a mérésben VLF lidércnek (VLF sprite). A jelenség nagy teljesítményű, állandó frekvenciájú (általában katonai célokat szolgáló) VLF adóállomások jeleire hangolt, keskeny sávú mérésekben jól tettenérhető, és hasonló a villámkisülésekkel kapcsolatban megfigyelt ún. klasszikus Trimpikhez, azaz a normális jelamplitúdóban és fázisban hirtelen kezdődő, majd többször 10 másodperc alatt logaritmus függvény szerint relaxálódó elugráshoz. A klasszikus Trimpik olyan elektronsűrűség-anomáliákhoz kötődnek, amelyeket a villámoknak az ionoszférán áthatoló (ún. whistler módusú) jelei által megzavart, a geomágneses tér erővonalai mentén addig csapdában levő, ionoszférába csapódó töltött részecskék (főleg elektronok) okoznak. Az ilyen elektronsűrűség-anomália kialakulásához a villámkisüléstől számítva általában hosszabb idő (>0.1 s) kell, míg a VLF lidércek ennél többnyire rövidebb, de kb. 20 ms-nál általában hosszabb időeltolódással jelentkeznek. A VLF lidércek ezáltal megkülönböztethetők a klasszikus Trimpiktől és sok esetben az ún. korai (early) Trimpiktől is, amelyek közvetlenül a villámkisülés utáni, felsőléggő kvázistacionárius elektromos tér és a VLF hullámok kölcsönhatásának a következményei és így időeltolódásuk a forrásvillámtól kevesebb, mint 20 ms. A VLF hullámok szórási mintázata a szórócentrum méretére utal, míg a jelperturbáció nagyságrendje az ionizáció mértékét jelzi. A VLF lidércek vizsgálata alapján a vörös lidércek által okozott ionoszférikus irregularitás lokalizáltabb, viszont intenzitása jelentős. Az emissziók testében kialakuló ionizáció mértéke 4-6 nagyságrenddel is meghaladhatja a környezetében található.

1.2. Lidércudvar (sprite halo)

A lidércudvar (sprite halo, 11. oldal, 2.d ábra) a vörös lidércekkel ellentétben homogénebb, diffúz gázkisülés, amelyben a nagyjából horizontális kisülési front – kiterjedve arra a teljes tértartományra, amelyben a térerősség meghaladja a kritikus értéket – lefelé mozog. A jelenség 70-85 km-es magasságban inicializálódik, legnagyobb horizontális átmérője akár 100 km is lehet, míg látszólagos vertikális kiterjedése 10 km-körüli. A

lidércudvar középpontja a megfigyelések szerint jól egyezik az őt kiváltó villámkisülés helyzetével.

Az emisszió közvetlenül a kisülés után jelenik meg és élettartama 1 ms körüli. A lidércudvarok sugárzása alkalmanként a vörös lidércekkel összemérhető, ugyanakkor legalább olyan változó is ($0.1 \text{ MR} \Rightarrow >10 \text{ MR}$). Élettartamuk rövidege miatt az észlelésük mégis nehezebb, csak érzékenyebb kamerák vagy fotométerek segítségével lehetséges. A fényesebb lidércudvarok fényképezésére azonban a vörös lidércek megfigyeléséhez használt kamerák is alkalmasak, mivel a két jelenség spektruma 600 nm fölött gyakorlatilag megegyezik, azaz a lidércudvarok is vörös színűek.

A rövid élettartam és a szoros kapcsolat a forrásvillámmal arra utal, hogy a jelenséget kiváltani képes villámoknak kritikus töltésmomentumuk mellett impulzív jellegűeknek is kell lenniük. A lidércudvarok és forráskisüléseik egyidejű, műholdról történt megfigyelésének elemzésével ez bizonyítást is nyert [Adachi et al., 2009]. A jelenséget pozitív és negatív polaritású kisülések fölött is megfigyelték, ami összhangban van a negatív villámkisülések pozitív villámokhoz képest impulzívabb jellegével. A jelenség kialakulásának magasságában intenzív és impulzív elektromos tér nemcsak a vertikális kisülések során eltávolított töltések következtében jöhet létre, hanem horizontális villámok sugárzási tere is megfelelő forrás lehet.

Vertikális kisülések esetén a lidércudvarok megjelenéséhez átlagosan kisebb töltésmomentum szükséges, mint a vörös lidércek kialakulásához [Hiraki és Fukunishi, 2006; Adachi et al., 2009]. Mivel negatív kisülések is kelthetnek ilyen jelenséget, nem meglepő, hogy a lidércudvarok előfordulásának gyakorisága nagyobb, mint a vörös lidérceké, percenként átlagosan 4 körüli (15. oldal, 4.c ábra) [Chen et al., 2008; Hsu et al., 2009]. Szárazfölkék fölötti előfordulásuk helyeinek eloszlása a vörös lidércekéihez hasonló, azonban vízfelületek fölött gyakrabban jelennek meg, mivel az óceánok és tengerek feletti kisülések jellemzően impulzívak a kisülés korábbi kialakulását megkönnyítő, az ekvipotenciális felületeket hajlító jelentősebb felszínmagasság-ingadozások hiánya miatt.

A lidércudvarok a vörös lidércekhez hasonló módon perturbálják a VLF hullámokat. Barrington-Leigh és munkatársai a jelenség modellezéséből származó eredményeik alapján a lidércudvarok és a korai (early) Trimpí események kapcsolatát valószínűsítették [Barrington-Leigh et al., 2001]. Moore és kollégái mérésekkel igazolták, hogy a megfigyelt korai Trimpí események VLF szórási mintázata a lidércudvarokban fellépő ionizáció mértéke és az emisszió méretei alapján várhatóval egybevág [Moore et al., 2003]. Marshall és munkatársai azonban rámutattak, hogy a lidércudvarok és a korai Trimpí jelenségek közvetlen

kapcsolatának egyértelmű igazolásához további vizsgálatok szükségesek [Marshall et al., 2006].

A vörös lidércek és a lidércudvarok megjelenését is az intenzív villámkisülések után a zivatarfelhő és az alsó ionoszféra között kialakuló, kvázi-stacionárius elektromos tér okozza. A vörös lidércek megjelenéséhez, az elektronlavinák kialakulásához nagyobb és viszonylag hosszabb ideig fennálló térerősség szükséges, míg a lidércudvarok keletkezésének feltétele, hogy egy jelentős amplitúdójú elektromos tér gyorsan épüljön fel. A két feltétel teljesülése nem zárja ki egymást, így különálló lidércudvarok kialakulása mellett előfordul, hogy ugyanaz a villám vörös lidércet is produkál. (Ilyet eddig csak pozitív polaritású forrásvillámok esetében figyelték meg.) A két emisszió létrejöttének időbeli sorrendje a 16-20 ms-os expozíciós idejű felvételeken nem mindig állapítható meg, de tulajdonságaiból fakadóan a lidércudvar megjelenése mindig megelőzi a vörös lidérc kialakulását.

1.3. Gyűrűlidérc (ELVES)

Az éjszakai ionoszféra aljánál, kb. 90 km-es magasságban a légkör sűrűsége olyan, hogy mind a felhő-föld villámkisülések után kialakuló kvázi-stacionárius tér által, mind a villámkisülések fővillámainak elektromágneses impulzusa által gyorsított elektronok több-kevesebb fénykibocsátásra képesek gerjeszteni a semleges N_2 molekulákat. Aktív zivatarok fölött az ionoszféra alsó határán a kvázi-stacionárius terektől eredő halvány, gyakorlatilag folytonos infravörös sugárzás műholdakról észlelhető.

A fővillámok elektromágneses impulzusa által generált tranziens gerjesztéseket 75-105 km-es magasságtartományban, jellemzően 90 km körül lehet megfigyelni. Az impulzus áthaladása után minimális időeltolódással a gerjesztett molekulák sugárzásos relaxációja egy legtöbbször gyűrű, vagy ha tetszik fánk alakú, az impulzus intenzitásától függően 100-700 km-es átmérőjű tartományon rövid idő alatt végbemegy (11. oldal, 2.e ábra). Az alakzat a belsejétől kifelé, a fénysebesség kb. háromszorosának megfelelő látszólagos sebességgel terjedve jelenik meg és összességében kevesebb, mint egy ezredmásodpercig észlelhető. Bár a gyűrűlidércek sugárzása ritkán elérheti a 10 MR értéket is, extrém rövid élettartamuk miatt többségében inkább csak érzékeny fotométerekkel detektálhatók. A jelenség angol neve a beszédes „elektromágneses impulzusforrások működésének következményeként kisugárzott fény és nagyon alacsony frekvenciás zavarok” kifejezés szavainak kezdőbetűiből alkotott

betűszó: ELVES (Emission of Light and Very low frequency perturbations due to Electromagnetic pulse Sources).

Bár a VLF zavarokat az emisszió nevébe is befoglalták, a gyűrűlidércekhez kapcsolható, szóródott VLF jelek amplitúdói a vörös lidérceknél tapasztaltakhoz képest általában kisebbek [Hobara et al., 2001]. A nagyobb magasság (hosszabb várható ionizációs relaxációs idő) ellenére a gyűrűlidércek esetében rövid karakterisztikus idejű (~0.5 s) perturbációkat („VLF gyűrűlidérceket”) észleltek, ami arra utal, hogy a VLF jelzavarok ebben az esetben nem a villámkisülés elektromágneses impulzusának ionizáló hatása miatt jönnek létre. Az elektromágneses impulzus ionizáló hatása az ionoszférában valószínűleg a VLF hullámok terjedése szempontjából szerepet játszó magasság fölött érvényesül, viszont az elektronok kinetikus energiájának növekedése (fűtés) ionizáció nélkül is okozhat a megfigyelttel konzisztens perturbációkat [Rodger és McCormick, 2006].

A gyűrűlidérceket kiváltó villámok orientációjukat és típusukat tekintve jellemzően vertikális felhő-föld kisülések. A függőleges irányultságra az emisszió hiányából lehet következtetni közvetlenül a kisülés fölött, másrészt inkább a felhővillámoknál átlagosan intenzívebb felhő-föld villámokra jellemző, hogy észlelhető mértékű optikai emissziót produkáló elektromágneses impulzust képesek kisugározni. A villámok polaritása a jelenség keltésének szempontjából irreleváns. Műholdas megfigyelések szerint a gyűrűlidércek a leggyakrabban előforduló FEOE típus. Globális előfordulási gyakoriságuk átlagosan 35-70 esemény percenként és úgy a tengerek, óceánok, mint a szárazföldek fölötti zivatarok alkalmával sűrűn megjelennek (15. oldal, 4.b ábra) [Chen et al., 2008; Hsu et al., 2009].

1.4. Kék nyalábok (blue jet, blue starter) és óriás nyaláb (gigantic jet)

A vörös lidércek és a gyűrűlidércek megjelenése, bár különböző mechanizmusok révén, egy-egy (többnyire felhő-föld) villámkisüléshez köthető. A kék nyalábok kialakulása inkább a töltésszétválasztó folyamatokkal van összefüggésben. Az elmélet szerint a zivatarfelhő felső, pozitív centrumában felhalmozódó töltések felé a felhő fölötti térrész szabad negatív töltéseinek áramlása indulhat meg. Amennyiben a pozitív rezervoár tere erős és a töltésszétválasztás a felhőben elég gyors ahhoz, hogy a semlegesítő folyamatokat ellensúlyozza, egy pozitív elővillám indulhat el felfelé. A nyaláb fejénél a szabad elektronok a N_2^+ ionokat gerjesztik, amelyek kék fényt bocsátanak ki. A nyaláb színe a töltésszétválasztó folyamatok intenzitására utal (nagyobb energia esetén a szín világosabb). A nyaláb végső

magassága pedig attól függ, hogy a töltésszétválasztó folyamatok mennyi ideig tudják fenntartani a szükséges térerősséget, illetve töltéssűrűséget a felső töltéscentrumban. Ezeknek a tulajdonságoknak a fényében megkülönböztetnek kis kék nyalábokat (blue starter) és közönséges kék nyalábokat (blue jets) (11. oldal, 2.f és 2.g ábra).

A kék nyalábok általában 16-20 km-es magasságú felhőkupolákból indulnak. A kis kék nyalábok hossza legtöbbször kevesebb mint 10 km, maximálisan kb. 26 km-ig jutnak el felfelé, növekedési sebességük 27 km/s és 150 km/s között változik. A közönséges kék nyalábok ezzel szemben a 40 km-es magasságot is elérhetik, miközben terjedési sebességük általában nem sokkal nagyobb, mint alacsonyabb rokonaiké (77-220 km/s). Közös jellemzőjük, hogy a nyaláb gyakran a függőleges irányhoz képest döntött ($\sim 6^\circ$ - 32°), a vége felé elhalványodik, illetve sokszor tölcseyszerűen kiszélesedik.

Az óriás nyaláb (gigantic jet, 11. oldal, 2.h ábra) [Pasko et al., 2002; Su et al., 2003; van der Velde et al., 2007; van der Velde et al. 2010; Kuo et al., 2009; Cummer et al., 2009] keletkezési mechanizmusa eltér a kék nyalábokétól. Magja a zivatarfelhő tetejétől alacsonyabban helyezkedik el és a jelenség a felhővillámhoz hasonlóan alakul ki, polaritása legtöbbször negatív [Krehbiel et al., 2008]. Az óriás nyalábok a felhőkupolán áttörve teljesen áthidalják a zivatarfelhő teteje és az ionoszféra alja közötti 70-80 km-es magasságkülönbséget és a két réteg közvetlen kapcsolatának direkt bizonyítékai. Színük a zivatarfelhőhöz közel gyakorlatilag fehér, ami a vörös lidércek magasságtartományában a semleges N_2 molekulák túlsúlya miatt vörösbe megy át. Az óriás nyalábok rendkívül impulzívok, sebességük 10^4 km/s nagyságrendű és a fő kisülést jellemzően egy kisebb utónyaláb (trailing jet) követi, amelynek a sebessége kb. 60 km/s.

Az óriás nyalábok teljes élettartama az utónyalábbal együtt 800 ms körüli, ami a megfigyelhetőségük előnyére válik, ráadásul a méreteik miatt is elvileg könnyebben észlelhetők. A kiindulási pontjuk környékén a legfényesebbek, sugárzásukat itt 0.5-1 MR-re becsülik. Mindezek ellenére a közelségük a zivatarfelhőhöz és az alsóbb részeiken kékes színük, ami a Rayleigh szórás miatt a távolsággal gyorsan halványul, megnehezíti a távoli észlelést, illetve a megkülönböztetésüket pl. nagyobb vörös lidércektől. Ennek köszönhetően viszonylag kevés kék nyaláb megfigyelés áll rendelkezésre. 2001/2002-ben történt felfedezésük óta [Pasko et al., 2002; Su et al., 2003] alig néhány 10 megfigyelt eseményről tudunk. Műholdas észlelések alapján becsült előfordulási gyakoriságuk mindössze 0.01 esemény percenként (15. oldal, 4.a ábra) [Chen et al., 2008].

Lehtinen és Inan az óriás nyalábok észlelésének egy lehetséges indirekt módszerére mutattak rá. A felsőlégköri kisülés következtében létrejövő ionok ~ 50 km alatt lassabban (>10

perc) rekombinálnak, ami a keskenysávú VLF észlelésekben a korai (early) Trimpiehez hasonló hirtelen amplitúdó/fázis elugrást, viszont nagyon hosszú relaxációs időt eredményez. Ilyen perturbációkat megfigyeltek ugyan, azonban kapcsolatuk az óriás nyalábokkal egyelőre nem bizonyított [Lehtinen és Inan, 2007].

A kék nyalábok és óriás nyalábok kialakulása tehát nem kapcsolható egyedi villámkisülésekhez, sőt a megfigyelések szerint a kék nyalábok megjelenése után 50 km-es körzetben a felhő-föld villámkisülések száma kb. 3 másodpercig csökkent. Az optikai emissziókat megelőzően különösen a negatív polaritású felhő-föld villámok kiugró gyakorisága jelezte a töltésszétválasztó folyamatok hatékony működését és ugyanakkor hozzájárult az alsó, negatív töltéscentrum befogadóképességének növeléséhez. A zivatarfelhőben a töltések gyors szétválasztását és elkülönülését jég jelenléte elősegíti. Ennek tulajdonítható, hogy az eddig megfigyelt kék nyalábok többsége jégesőt hozó zivatarfelhők fölött alakult ki.

1.5. Egyéb felsőlégköri elektro-optikai emissziók

A vörös lidércek, lidércudvarok, gyűrűlidércek és kisebb részben a különböző nyalábok teszik ki a megfigyelt FEOE-k döntő hányadát. Van azonban néhány további elektro-optikai emissziótípus, amelyet mindeddig csupán néhány alkalommal figyeltek meg, és vagy egyik említett fő csoportba sem sorolható, vagy éppenséggel több csoport tulajdonságaiból is hordoz elemeket. Legtöbbjüket a STEPS 2000 (Severe Storm Electrification and Precipitation Study) megfigyelési kampány során észlelték észak-amerikai zivatarok fölött [Lyons et al., 2000; Lyons et al., 2003a]. Mivel az esetek többségében csak néhány megfigyelt jelenségről tudunk és részletes analízis mindeddig nem készült, általában csak fenomenológiai leírásra szorítkozhatok.

A törpék (gnomes, 11. oldal, 2.i ábra) mindössze kb. 200 m széles, 1 km hosszú, rendkívül fényes kilövellések a zivatarfelhő konvektív magja fölött a felhő tetejéről. Egyetlen alkalommal 20 perc alatt 17 eseményt rögzítettek. A megfigyelt egyedek élettartama 30-130 ms között változott. Terjedési sebességük felfelé legfeljebb 10 km/s lehetett.

A tündérkék (pixies, 11. oldal, 2.j ábra) neve abból ered, hogy csak 1-1 pixel felfénylését okozták a felvételeken. Csoportosan jelentek meg szintén a zivatarfog fölötti felhőtetőn. A törpékkel közös megfigyelési időszak alatt 83 tündérkét regisztráltak. Egyik esetben sem maradtak fent tovább egy képkockányi időnél (itt 16.6 ms).

A trollok (TROLL – Transient Red Optical Luminous Lineament, azaz átmeneti optikai, vörös, fénylő „vonás”, 11. oldal, 2.k ábra) a vörös lidércek mélyre nyúló alsó szálain, kb. 150 km/s látszólagos sebességgel felfelé haladni látszó, szintén vörös felfénylések. Valójában egyre magasabbról induló, lefelé irányuló kisebb kisülések sorozataként állnak elő és kb. 50 km-es magasságban enyésznek el. Összességében kb. 100 ms-ig láthatók.

A pálma lidércek a legelső megfigyelt példány alakja után kapták a nevük, többségükben inkább lombos fához, illetve bozóthoz hasonlatosak (11. oldal, 2.1 ábra) [Heavner, 2000; Marshall és Inan, 2007; van der Velde et al., 2007]. A trollokhoz hasonlóan kiterjedt, intenzív vörös lidérc eseményekkel összefüggésben jelennek meg, azonban azoktól horizontálisan eltolódva. Egészen a zivatarfelhő tetejéről kiindulva kb. 55 km-es magasságig hatolnak fel, mint a kék nyalábok, azonban színük vörös és kb. 50-100 ms-ig figyelhetők meg.

A Columbia űrsikló tragikus véget ért 2003-as küldetése során a világűrben fényképezték az idáig egyetlen megfigyelt TIGER eseményt (Transient Ionospheric Glow Emission in Red, azaz vörös, átmeneti ionoszférikus ragyogás) [Yair et al., 2005]. Az emisszió egyetlen video képkockán volt csak látható (ami itt legfeljebb 33 ms-os élettartamot enged meg) és alakilag egyetlen ismert FEOE-ra sem hasonlított. Teljes fényessége 310 kR körüli volt. A megfigyelését megelőző utolsó villámkisülést 230 ms-mal korábban több, mint 1000 km-rel eltolódva észlelték. Az emisszió magasságát nem sikerült pontosan meghatározni. Yair és munkatársai felvetették, hogy a jelenség a megfigyelés mágneses konjugált pontjában bekövetkezett villámkisüléstől eredő közvetett ionoszféragerjesztés eredménye is lehetett.

II. A FEOE-k forrásvillámmainak töltésmomentum-változása

A felsőlégköri elektro-optikai emissziók közül a vörös lidércek, a lidércudvarok és a gyűrűlidércek kialakulása áll közvetlen kapcsolatban a klasszikus, troposzférikus villámkisülésekkel. A gyűrűlidércek megjelenése a forrásvillám elektromágneses impulzusa által gyorsított elektronok hatására bekövetkező gerjesztések következménye, a vörös lidércek és a lidércudvarok azonban maguk is gázkisülési jelenségek. E két utóbbi emisszió intenzív villámkisülések után a zivatarfelhő és az ionoszféra között felépülő elektromos térben jön létre, ezért e jelenségek kialakulása és tulajdonságai a környező elektromos tér erősségétől és szerkezetétől is függenek. A környező elektromos tér tulajdonságaira a forráskisülés jellemzői alapján következtetni lehet, ezért az emissziók forráskisüléseinek tanulmányozása kiemelten fontos a jelenségek megismerésében.

A FEOE-k forrásvillámainak vizsgálata először a vörös lidércekkel kapcsolatban merült fel, mivel a jelenségkör felfedezését követő években fényessége, élettartama és méretei miatt ezt az emissziótípust figyelték meg legtöbbször. Boccippio és munkatársai Észak-Amerikában a helyi villámfigyelő hálózat (National Lightning Detection Network – NLDN, [Cummins et al., 1998]) villámadataival vetették össze vörös lidércek észlelési időpontjait. A vizsgált két vihar ideje alatt megfigyelt vörös lidércek 86%-át, illetve 82%-át pozitív polaritású felhő-föld villámokkal tudták összefüggésbe hozni [Boccippio et al., 1995]. Ezt a megfigyelést azóta számos további észlelés tapasztalata erősítette meg. Már a FEOE-k létrejöttét magyarázó korai modellek is [Wilson, 1925; Pasko et al., 1995; Roussel-Dupré és Gurevich, 1996] kiemelték, hogy az emissziók kialakulásának szempontjából kulcsfontosságú felsőléggöri kvázi-stacionárius tér erőssége felhő-föld villámok esetén a kisülés (vertikális) töltésmomentum-változásának a függvénye (11. oldal, 1. ábra). A vertikális töltésmomentum-változás fehér-föld villámoknál a kisülés közben átáramlott töltésmennyiségnek és a kisülési csatorna magasságának a szorzata, illetve ennek a kétszerese, ha a kisülő töltéscentrum földfelszín alatti tükörpárját is figyelembe vesszük.

II.1. A töltésmomentum-változás meghatározásának módszerei villámkisülések esetében

A töltésmomentum-változás meghatározásának egyik módja a kisülés közben átáramlott töltésnek és a kisülési csatorna hosszának az egyenkénti mérése és a kapott értékek összeszorozása. A kisülés közben átáramlott töltések mennyiségét elő lehet állítani a kisülés áramának integrálásával, vagy a zivatar közelében a földfelszínen, egyidejűleg több ponton mért (statikus) elektromos térváltozások alapján [Uman, 1987, 11.5. fejezet]. A villámkisülés áramának közvetlen mérése megfelelően felszerelt, pl. távközlési tornyokba csapó villámok [Berger et al., 1975], vagy rakétákkal kiváltott villámkisülések [Rakov és Uman, 2003, 7. fejezet] vizsgálatával lehetséges. Ezek a mérések segítenek a villámok áramerősség-változásainak általános megismerésében, de nem teszik lehetővé a FEOE-kat keltő és az ilyeneket nem produkáló villámkisülések összehasonlítását. A mesterséges környezet (torony, illetve rakéta) miatt ráadásul a vizsgált villámok nem reprezentálják pontosan a normál körülmények között kialakuló villámkisüléseket.

Ez utóbbi problémát a zivatar statikus elektromos terének több ponton való mérésén alapuló technika küszöböli ki [Krehbiel et al., 1979]. Ezeknek a módszereknek az alkalmazása

komolyabb technikai háttérrel igényel, ami helyhez kötött, míg a FEOE-k létrejöttének pontos helye és ideje jelenleg nem határozható meg előre. Ezen túlmenően a kisülési csatorna pontos hosszának a mérése is problémát jelent, mivel annak a felhő belsejében folytatódó szakaszait, elágazásait nehéz feltérképezni.

A villámkisülések árammomentumának a kisülési csatorna fényessége alapján történő közvetlen meghatározását dolgozták ki Adachi és munkatársai [Adachi et al., 2009]. Az eljárás alkalmazható műholdas megfigyelések esetében is, így nem helyhez kötött és globális felmérésre ad lehetőséget. Hátránya azonban, hogy a műhold egyszerre csak egy véges területet tud megfigyelni, ezért a sporadikusan előforduló FEOE-kkal kapcsolatban csak hosszabb idő alatt képes több információt gyűjteni, illetve egy adott terület állandó megfigyelése (geostacionárius pályájú műhold alkalmazása) nem kifizetődő.

A FEOE-k forrásvillámainak a tanulmányozása szempontjából előnyösebbek a kisülések áram-, illetve töltésmomentum-változásait meghatározó azon indirekt módszerek, amelyek a kisülés elektromágneses sugárzásának a mérésén alapulnak. A villámkisülés időben változó dipólusmomentumú elektromos dipólusnak is tekinthető. Pontszerűnek feltételezett, időben változó momentumú elektromos dipólus elektromágneses terének leírása retardált potenciálok, illetve a Hertz-vektor segítségével széles körben ismert. Az elektromos (\vec{E}) és mágneses (\vec{H}) térkomponensekre adódó végeredmény [Nagy, 1989, 47. fejezet]:

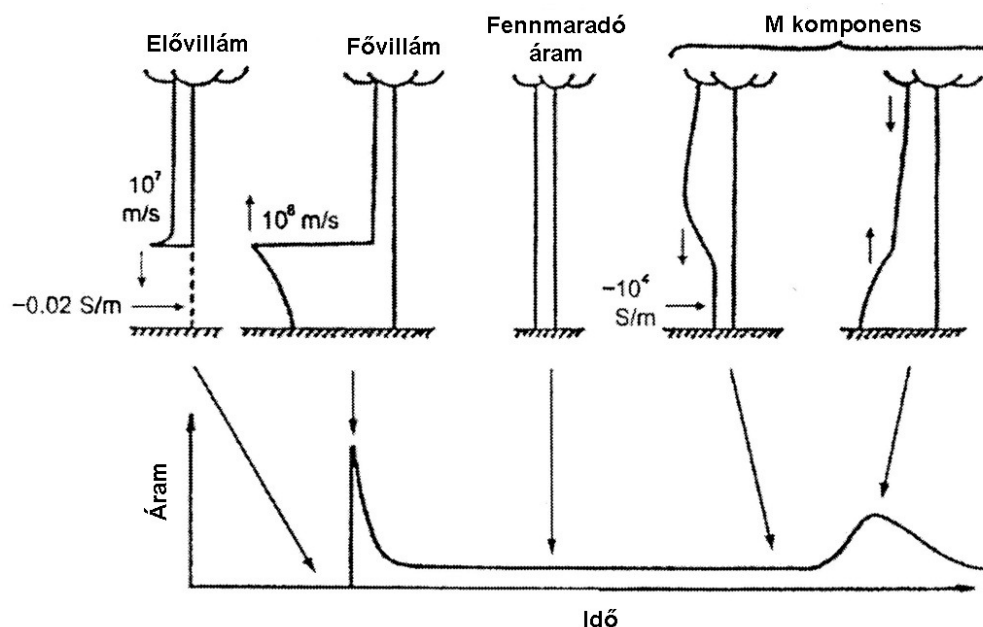
$$E(\vec{r}, t) = \frac{3(\vec{r} - \vec{r}_0)(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{p})}{r^5} - \frac{\vec{p}}{r^3} + \frac{1}{c} \left[\frac{3(\vec{r} - \vec{r}_0)(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{p}')}{r^4} - \frac{\vec{p}'}{r^2} \right] + \frac{1}{c^2} \left[\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0)(\vec{r} - \vec{r}_0, \vec{p}'')}{r^3} - \frac{\vec{p}''}{r} \right]$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = -\frac{(\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{p}'}{r^3} - \frac{1}{c} \frac{(\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{p}''}{r^2}$$

Az egyenletekben \vec{r} a helyvektor, \vec{r}_0 a pontszerű dipólus helyvektora, $\vec{p} = \vec{p}(t - r/c)$ az időtől függő dipólusmomentum, \vec{p}' és \vec{p}'' ennek idő szerinti első és második deriváltjai, c a fénysebesség. Az elektromos térkomponensben az $1/c^2$ -tel arányos tag, a mágneses térkomponensben az $1/c$ -vel arányos tag írja le a keletkező elektromágneses hullámokat. (A villámkisülések terének általános és teljesebb leírását Thottappillil adja meg [Thottappillil, 2003].) A kifejezésekben csak a dipólusmomentum szerepel, ezáltal az elektromágneses sugárzás alapján közvetlenül az áram-, illetve a töltésmomentum-változásra lehet következtetni és a kisülési csatorna méretének bizonytalanságából adódó probléma kiküszöbölhető. A töltésmomentum meghatározásának módszerét a kisülés elektromágneses sugárzása alapján az alábbi fejezetekben részletezem.

II.2. A villámkisülések elektromágneses sugárzása - atmoszferikék (atmospherics)

A villámkisülés széles frekvenciasávú adóantennának is tekinthető [Uman, 1987]. A kisülés összetett folyamat (5. ábra), amelynek különböző szakaszai eltérő frekvenciatartományokban sugároznak a legintenzívebben.

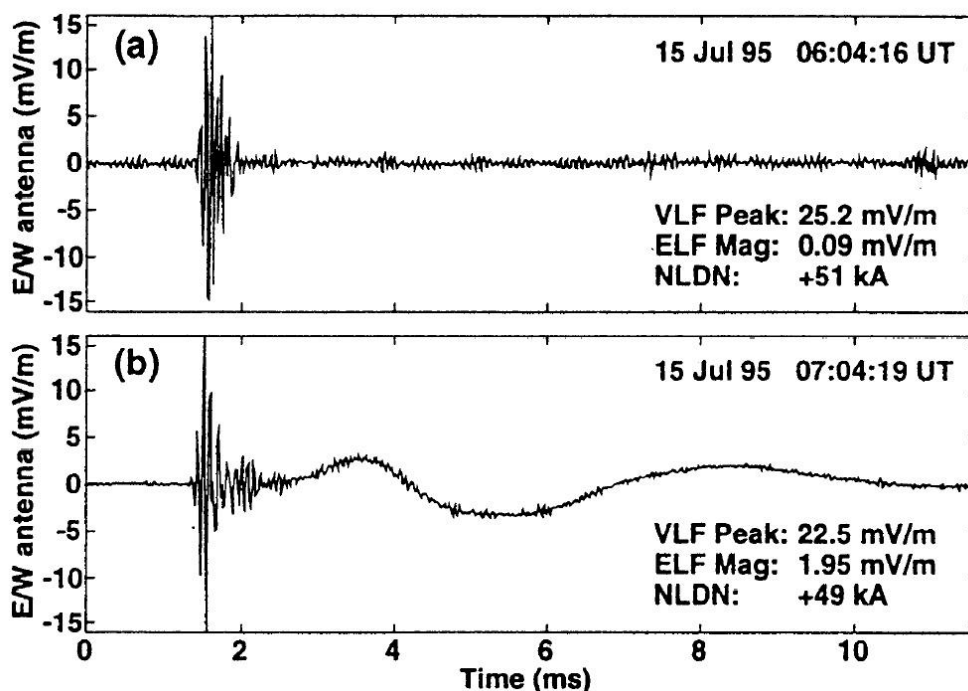


5. ábra: Többszörös felhő-föld villámkisülés egy egységének fő szakaszait vázoló rajz a kisülési frontok haladásának sebességével és irányával, valamint a vezetőképességi különbségek feltüntetésével (fent). **Az alsó ábra** az egyes kisülési szakaszoknál a földfelszínen mérhető áram alakulását szemlélteti [Rakov et al., 2001, Figure 1.].

A fővillámot megelőző részfolyamatok, amelyek eredményeképpen a kisülési csatorna felépül, illetve többszörös villámok esetén két fővillám között felfrissül, jellemzően a VHF (Very High Frequency – nagyon magas frekvencia, 30-300 MHz) tartományban sugároznak. A fővillám a kisülés legintenzívebben és a legszélesebb frekvenciatartományban sugárzó szakasza. A kibocsátott elektromágneses hullámok az ELF (Extremely Low Frequency – extrém alacsony frekvencia, 3 Hz – 3 kHz) tartománytól a VHF sávon át, gyakorlatilag a tágabb értelemben vett teljes rádiófrekvenciás tartományon (azaz az infravörösnel nagyobb hullámhosszakon) észlelhetők. A kisüléshez közeli mérések alapján a kisugárzott intenzitás 10 kHz környékén, azaz a VLF sávban a legintenzívebb [Uman, 1987, 7. fejezet; Bencze et al., 1982].

A villámkisülés során keletkező elektromágneses hullámok a Föld jól vezető felszíne, és az ionoszféra 60-90 km magasságban található, ugyancsak jó vezetőnek tekinthető alsó határrétege [Rycroft et al., 2008] által meghatározott hullámvezetőben terjednek. A két vezető felületen a néhány MHz-nél alacsonyabb frekvenciájú rádióhullámok csak speciális esetben

juthatnak át (ún. whistler módusú hullámterjedés [Rakov és Uman, 2003, 13.1, 13.2, 13.5 fejezet]), egyébként a hullámvezetőben rekednek és például a határfelületeken való visszaverődés révén a forrásuktól nagyobb távolságban is észlelhetők.



6. ábra: VLF atmoszferik ELF lomha véggel (b) és anélkül (a) az antarktisi Palmer mérőállomás kelet-nyugati (E/W) mágneses hurok antennájának adatsorában az idő (time) függvényében. Az ábrákon a VLF és az ELF sávban észlelt legnagyobb amplitúdók és az észak-amerikai forrásvillámok helyi villámfigyelő hálózat (National Lightning Detection Network – NLDN, USA) által meghatározott csúcsáramértéke is szerepel [Riesing et al., 1996, Figure 1.].

Alexander Sztjepanovics Popov már 1896-ban felfedezte, hogy a zivatarok elektromágneses sugárzás forrásai [Popov, 1896]. Popov az egyes villámkisülésekből származó, a háttérből kiemelkedő, nagyobb amplitúdójú, néhány tizedmásodperces, vagy rövidebb tranziens elektromágneses hullámcsomagokat (atmoszferikék, röviden szferikék) a zivatarok előrejelzésére használta. A szferikék „eleje” vagy „feje” főleg VLF tartományba eső komponenseket tartalmaz, de különösen a forráshoz közelebb (néhányszor 100 km-es távolságig) magasabb frekvenciás összetevői is vannak. Appleton és munkatársai 1926-ban megfigyelték, hogy a szferikék szokásos jelvonulatát alkalmanként egy második, alacsonyabb frekvenciájú és némileg kisebb amplitúdójú oszcilláció követi, ami „lomha vég”-ként (slow tail) került be a köztudatba [Appleton et al., 1926] (6. ábra). A lomha végek inkább az ELF sáv alsó hányadába eső hullámokból állnak. A kétféle jel viszonylag könnyen elkülöníthető a mérésekben, mert a Föld-ionoszféra hullámvezetőben a jelek csillapításának helyi maximuma van a VLF és az ELF sáv határának közelében (2 kHz körül), másrészt a hullámterjedés sebessége is eltérő a két frekvenciatartományban [Hales, 1948].

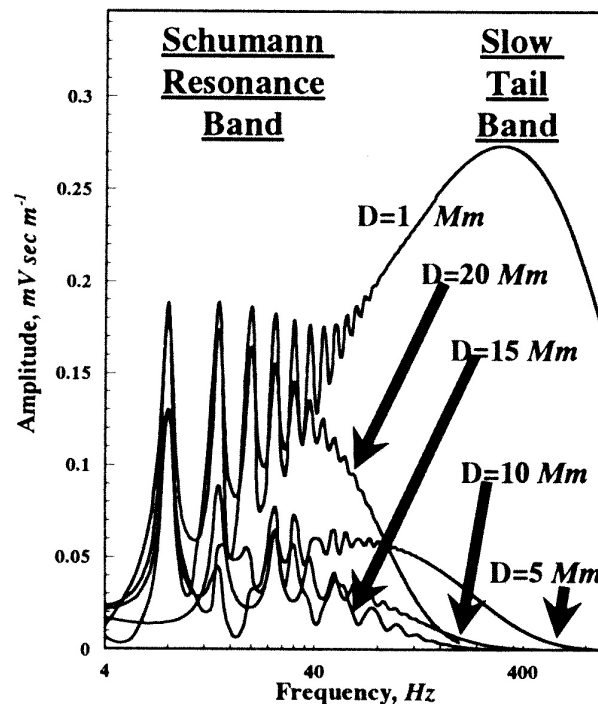
Pierce 1953-ban megfigyelte, hogy számos villámkisülés fővillámát egy lassabban változó fennmaradó áram (continuing current) követi [Pierce, 1955] (25. oldal, 5. ábra). Hepburn, miközben 1957-ben részletesen tanulmányozta a lomha végatmoszferikék tulajdonságait az 1000 Hz alatti frekvenciatartományban [Hepburn, 1957], feltételezte, hogy a lomha végatmoszferikék forrása a villámkisülések fennmaradó áram szakasza. Wait később 1960-ban az addigi elméleti megfontolások összefoglalása és pontosítása mellett rámutatott, hogy ez a kisülési részfolyamat valóban a lomha végatmoszferikék energiájának számottevő részét szolgáltathatja [Wait, 1960].

II.3. ELF atmoszferikék és Schumann-rezonancia tranziensek (SRT-ek)

Az ELF tartományban megfigyelhető atmoszferikeket (a továbbiakban ELF szferikék) tovább célszerű osztályozni aszerint, hogy a frekvenciatartomány melyik részében koncentrálódik az energiájuk. A „tépett” (tweek) atmoszferikék az ELF sáv felső részében és a VLF sávban egyaránt megfigyelhetők. A tweek atmoszferikék jelei különösen az éjszakai kedvezőbb terjedési viszonyok mellett a forrásuktól több ezer km-t tesznek meg a Föld-ionoszféra hullámvezetőben a határoló felületek között visszaverődve, miközben a hullámcsomag a diszperzió miatt általában számottevően megváltozik. A hullámcsomag energiája különböző terjedési módusokba koncentrálódik, amelyek mindegyike csak egy bizonyos határfrekvencia (cut off frequency) fölött maradhat fenn. A tweek atmoszferikék első (alsó) terjedési módusának a határfrekvenciája 1.6-1.8 kHz körül van [Ostapenko et al., 2010]. Ilyen értelemben beszélhetünk kb. 1.6-1.8 kHz alatt az ELF sáv alsó hányadáról, amit kb. 50-60 Hz-nél szintén kétfelé bonthatunk.

Az ELF tartomány legalsó részében (50-60 Hz alatt) akkor beszélhetünk az energia koncentrálódásáról, ha villámkisülés közben kisugárzott jelek a forrásuktól az észlelésükig legalább 2-3 Mm-t (1 Mm = 1000 km) már megtettek a Föld-ionoszféra hullámvezetőben (7. ábra, a következő oldalon). A magasabb frekvenciájú komponensek a nagyobb mértékű energiavesztés (a néhány kHz-es tartományban 20 dB / 1000 km) miatt hamarabb eltűnnek a spektrumból. Tepley több ezer villámkisülés elektromágneses hullámait figyelte meg a VLF és ELF sávban egyidejűleg a 2.5-25 kHz-es, illetve a 10-1000 Hz-es tartományokban [Tepley, 1959] és feljegyezte, hogy számos ELF atmoszferik nagyobb frekvenciás VLF „fej” nélkül jelent meg a mérésekben. Ezeket távolabbi forrásokból származónak valószínűsítette és a jelenséget a VLF tartományban nagyobb csillapítással magyarázta. Különösen 50-60 Hz alatt

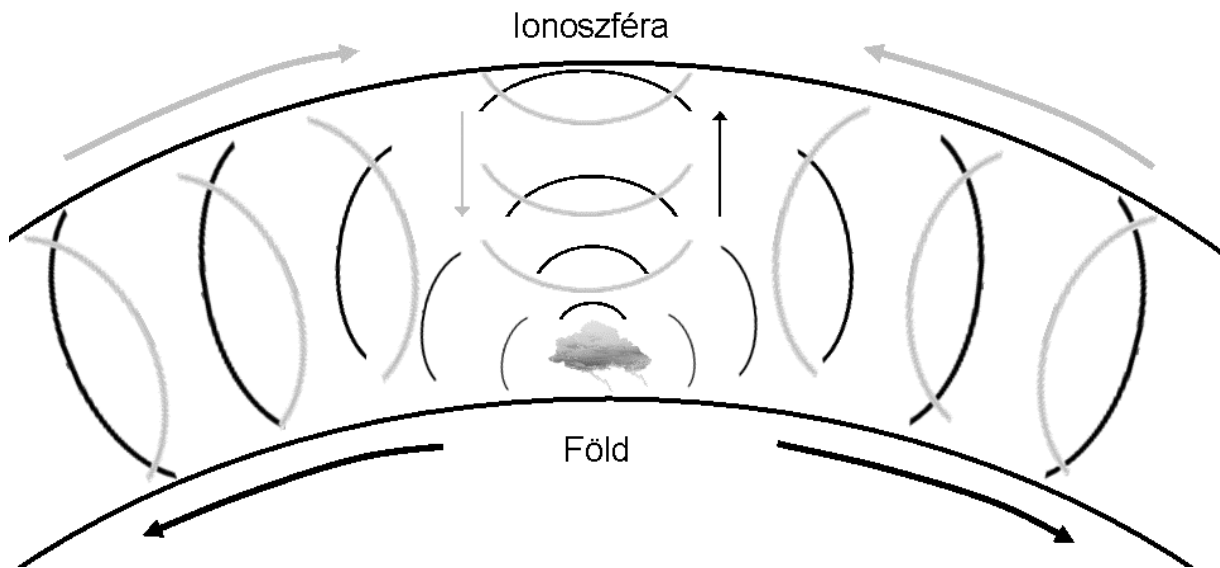
azonban a csillapítás viszonylag csekély, 1 dB / 1000 km alatti érték [Volland, 1982, 238. oldal, Determination of Propagation Characteristics, Attenuation Rate; Burke és Jones, 1992], ezért az ilyen komponensekből álló hullámcsomagok akár többször is körbe tudják futni a Földet, mielőtt az energiájuk teljesen disszipálódik. Ekkora távolságon és ebben a frekvenciasávban a Föld-ionoszféra környezet gömbszimmetrikus geometriájának hatása már nem hanyagolható el, ezért figyelembe kell venni a spektrumok pontos leírásában [Nickolaenko és Hayakawa, 1998].



7. ábra: Modellezett ELF impulzusok vertikális elektromos térkomponensének spektrális amplitúdói a frekvencia függvényében ábrázolva, különböző forrás-észlelő távolságok (D) esetén. Az ábrán jelölték a Schumann-rezonanciák és a lomha végatmoszferikék (slow tail) jellemző frekvenciasávját [Nickolaenko és Hayakawa, 1998, Figure 1.].

A Föld felszíne és az ionoszféra 60-90 km magasságban található alsó határrétege által közrezárt, első közelítésben gömbhéj alakú térrész elektromágneses értelemben zárt üregnek tekinthető az ELF hullámok terjedésének szempontjából. Az energiavesztés mértéke a határolófelületek tulajdonságai mellett az üreg rezonanciajellemzőitől is függ, azaz a rendszer sajátrezgéseinek közeli frekvenciáknál kisebb. Egy üreg sajátrezgése azokon a frekvenciákon, illetve hullámhosszakon található, amelyeken az üregben terjedő hullámok szuperpozíciójának eredményeképpen állóhullámok alakulhatnak ki. A Föld-ionoszféra üreg jellemzően gömbhéjszimmetriája miatt két különböző módon alakulhatnak ki állóhullámok: a földfelszínen, és az ionoszférán visszaverődő jelek szuperpozíciója által radiális (a földön állva vertikális) irányban, valamint a határfelületekkel párhuzamosan, a Föld kerülete mentén (8. ábra, a következő oldalon). Az előbbi sajátrezgések gerjesztéseit transzverzális

rezonanciáknak nevezik, míg az utóbbi típusú sajátrezgések (más néven módusok) gerjesztései az ún. Schumann-rezonanciák (SR) [Schumann, 1952; Price et al., 2007].



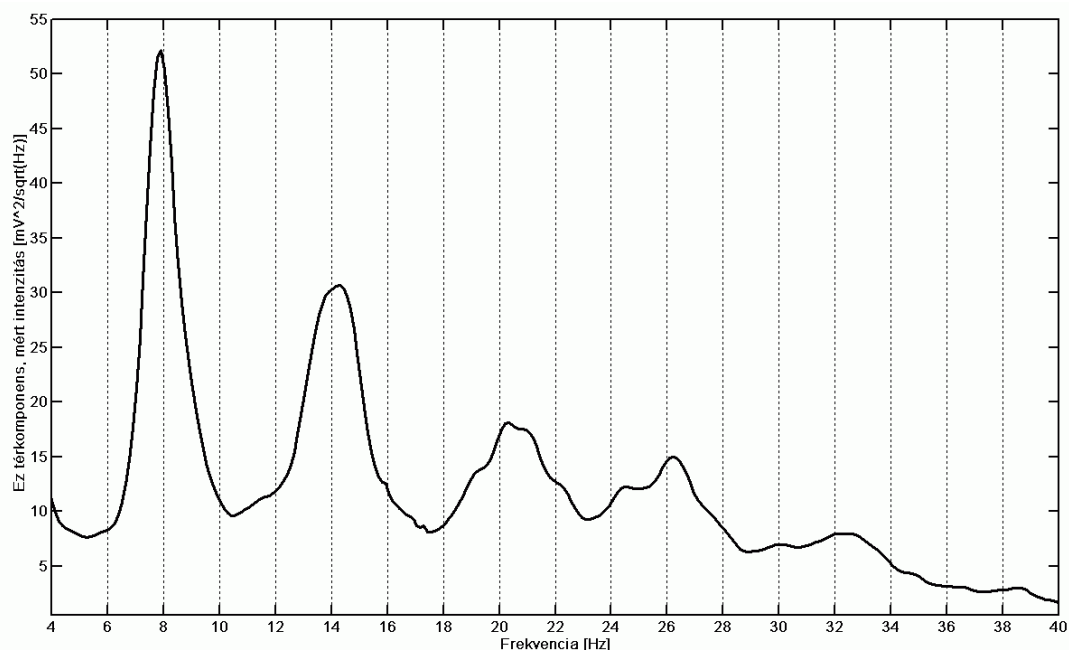
8. ábra

Elektromágneses állóhullámok kialakulása a földfelszín és az ionosféra alsó határa között.

A Föld-ionosféra gömbhéj jellemző kiterjedései jelentősen különböznek. Az üreg „magassága” (gyakorlatilag az ionosféra alsó határrétegének a tengerszint feletti magassága) kb. 60-90 km, míg a „szélessége” a másik két dimenzióban az állóhullámok kialakulásának szempontjából a Föld kerületével jellemezhető, kb. 40000 km. A különböző méretek miatt a transzverzális rezonanciák és a SR-ák eltérő frekvenciatartományba esnek. Az alap SR frekvencia 8 Hz körüli, amelyet a felharmonikusai kb. 6 Hz-enként követnek, azaz a magasabb ún. rezonanciamódusok frekvenciája kb. 14 Hz, 20 Hz, és így tovább. (A Föld-ionosféra rendszert azon frekvenciák közelében, ahol a rezgések hullámhossza a hullámvezető laterális kiterjedésével összemérhető, üregrezonátornak tekinthetjük.) A transzverzális rezonanciák alapfrekvenciája 1500-2500 Hz körüli, tehát az alsó módusokat tekintve a különbség két nagyságrend [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 2.3. fejezet]. A néhány kHz-en jelentősebb csillapítás miatt a transzverzális rezonancia inkább a gerjesztő forrása szűkebb horizontális környezetében észlelhető lokális jelenség [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 6.8.2. fejezet]. A SR-ák hatását ezzel ellentétben éppen globális távolságokon történő hullámterjedés esetén szükséges figyelembe venni.

Bolygónkon minden időpillanatban kb. 2000 zivatargóc aktív [Chalmers, 1967], és átlagosan 40-50 villámkisülés következik be másodpercenként [Christian et al., 2003]. A kis csillapítás miatt a kisugárzott elektromágneses hullámok energiája nem csökken jelentősen a következő villámkisülésig, így a villámok az üregrezonátort kvázi-folytonosan gerjesztik

[Sentman, 1995, 3.6. fejezet]. A Föld-ionoszféra rezonátorban ezért mindig található energia az ELF tartomány alsó hányadában. Ezt légköri ELF rádiózajként is ismerik, amelynek a spektrumából kiemelkednek a sajátrezgések frekvenciáihoz tartozó SR csúcsok (9. ábra). Ezeket a rezonanciákat „háttér” Schumann-rezonanciáknak nevezzük, mivel mindig megfigyelhetők. A háttér SR-akat gerjesztő energia a bolygószerke szabálytalan időközönként bekövetkező átlagos kisülések közben kisugárzott inkoherens elektromágneses hullámok energiáinak összege.

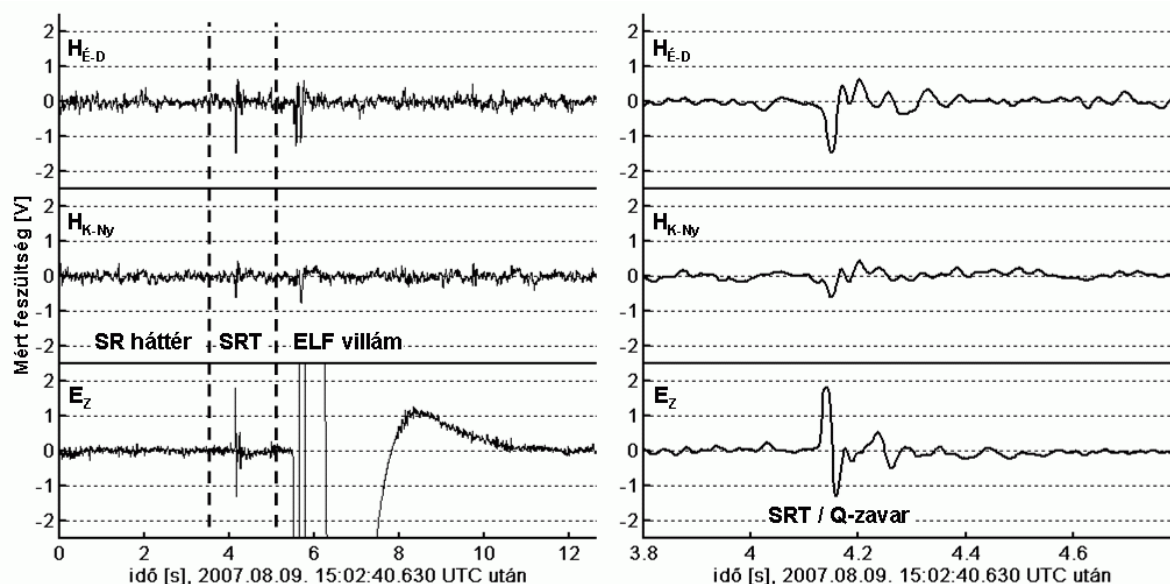


9. ábra

A vertikális elektromos (E_z) térkomponens energiaspektruma a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban 2005. július 29-én, 00:34-00:39 UTC

Az ELF rádiózajban időnként megfigyelhetők a háttér átlagos amplitúdóját akár 1-2 nagyságrenddel meghaladó, általában egy másodpercnél rövidebb idő alatt lecsengő zavarok, amelyeket ELF tranzienseknek neveznek. Az ELF tranziensek között található mesterséges és természetes eredetű jelek is. Az ELF tranziensek egy csoportját olyan különösen intenzív villámkisülések jelei alkotják, amelyek bekövetkezése közben az ebben a frekvenciatartományban kisugárzott elektromágneses energia többszöröse is lehet egy átlagos villámkisülés során produkáltnak. A Föld-ionoszféra rendszerben való terjedés során ezek a hullámok felveszik az üreg rezonanciajellemzőit. Különösen igaz ez azokban az esetekben, amikor a hullámok kezdeti energiája akkora, hogy a közvetlenül a forrásból érkező direkt ELF szferik és a Földet az ellenkező irányban megkerült másodlagos jelek után ezek egy vagy több teljes főkört befutott visszatérései is megjelennek a mérésekben. Az ilyen, összességében általában néhány tizedmásodpercig tartó, a háttérből kiemelkedő, gyakran szekvenciális ELF

hullámvonulatokat nevezik Schumann-rezonancia tranzienseknek (SRT), a néhány Hz-től kb. 50-60 Hz-ig húzódó frekvenciatartományt pedig SR frekvenciasávnak.



10. ábra: Természetes eredetű elektromágneses jelek a Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium Schumann-rezonancia méréseiben. (H_{E-D} és H_{K-Ny} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseinek, E_z a vertikális elektromos térkomponensnek az idősorát jelöli.)

Az alsó néhány SR csúcs frekvenciatartományában először Ogawa és munkatársai osztályozták a természetes eredetű elektromágneses jeleket [Ogawa et al., 1966]. Először alkalmazva gömbantennát a vertikális elektromos tér mérésére, egyszerre több frekvenciatartományban (3-16 Hz, 2-50 Hz és 200-8000 Hz) folytattak párhuzamos észleléseket. Az ELF háttéren („ELF continuous”) kívül leírtak különösen nagy amplitúdójú ELF „villámokat” („ELF flash”), amelyek valószínűleg 1000 km-nél közelebbi forrásokból származtak és ELF „zavarokat” („burst”), amelyek forrásaiban távolabbi villámkisüléseket sejtettek (10. ábra). Az ELF zavarok két változatát figyelték meg: az N típusú („noisy”, azaz zajos) zavart, ahol az ELF jelet magasabb frekvenciájú fokozott intenzitású zaj követte, és a Q típusú („quiet”, azaz csendes) zavart, ahol ugyanez elmaradt. Az átlagosan intenzívebbnek talált Q-zavarok egy része csillapodó oszcillációt mutatott, amelynek jellemzően 8 Hz körüli, a SR-ák alapl módusával gyakorlatilag azonos frekvenciája volt. A SRT-eket és a Q-zavarokat a szakirodalomban gyakran szinonimaként emlegetik [Nickolaenko et al., 2010]. A gyakorlatban nincs mindig párhuzamos magasabb frekvenciás észlelés, és így előfordulhat, hogy a tárgyalt Q-zavarok egy része valójában N-zavar, ez azonban a levont következtetéseket nem befolyásolja.

II.4. A SRT-ek és a FEOE-k forrásvillámainak kapcsolata

A villámok elektromágneses sugárzásának összetételét és intenzitását a kisülés árammomentuma határozza meg. A Föld-ionoszféra hullámvezető átviteli tulajdonságai mellett – még alacsony frekvenciáknál is – a forrás jellemzői is számottevő hatással vannak a megfigyelt hullámformára, ahogyan azt Schumann lomha végatmoszferikék tanulmányozása alapján kimutatta [Schumann, 1956].

A villámkisülés során az áramerősség változását 2-4, időben exponenciálisan csökkenő tag összegével modellezzük, amelyek a kisülés különböző szakaszát jellemzik (pl. elővillám, fővillám / többszörös fővillámok) [Bruce és Golde, 1941; Williams, 1959; Jones, 1970c]. A nagy léptékben exponenciális lefutásból következően a kibocsátott sugárzás intenzitása a kisülés töltésmomentumának a függvénye. Jones 1970-ben elemezte villámkisülés különböző szakaszainak lehetséges ELF sugárzását és meghatározta egy átlagos villámkisülés paramétereit [Jones, 1970c]. Modellezte a kisülés árammomentum-spektrumát és számításai szerint az elővillám és a fővillám során bekövetkező teljes töltésmomentum-változás (a földfelszín alatti tükörtöltések megszűnését is beleszámolva) 60 C·km.

Burke és Jones 1996-ban rámutattak, hogy a SRT-ek forrásainak töltésmomentuma 30-40 szerese is lehet az átlagos kisülésének, miközben csúcsáramuk nem feltétlenül nagyobb sokkal az átlagosnál [Burke és Jones 1996]. A nagyobb töltésmomentum Burke és Jones eredményei szerint legtöbbször az átlagosnál jóval hosszabb, 25-30 ms-os karakterisztikus idővel jellemezhető fennmaradó áramból származik. A hosszú fennmaradó áram a pozitív polaritású felhő-föld villámkisülésekre jellemző (az elektromos dipóluskisülés pozitív pólusa a zivatarfelhőben van), a negatív polaritású kisülések átlagosan impulzívabb jellegűek [Uman, 1987, 11. és 7.2.2. fejezet]. Ez magyarázza az észlelt pozitív polaritású SRT-ek és lomha végatmoszferikék dominanciáját mind az átlagos intenzitásukat, mind gyakoriságukat illetően.

Az ELF sugárzás intenzitását a töltésmomentum második tényezőjén keresztül a kisülési csatorna hossza is befolyásolja, nevezetesen ugyanakkora töltésmennyiség semlegesítésekor hosszabb csatorna esetén nagyobb intenzitás várható [Nickolaenko és Hayakawa, 1999].

A SRT-ek esetében további szempont a kisülési csatorna orientációja. A forrástól több ezer km távolságban az elektromágneses hullámok csak olyan terjedési módusokban maradhatnak fenn, amelyek terében az elektromos és mágneses komponensek irányai megfelelnek a hullámvezető geometriája által meghatározott határfeltételeknek. A Föld-

ionoszféra gömbhéjúreg alacsony frekvenciákon a hullámhosszhoz (>5000 km) képest kis magasságú (60-90 km), a szög koordináták szerint végtelen kiterjedésű hullámvezető. Egy ilyen rendszerben a forrástól távol ($>1-2$ Mm-re) csak azokban a terjedési módusokban maradhat energia, amelyekben az elektromos tér főként a radiális, a mágneses tér pedig gyakorlatilag a horizontális komponensében koncentrálódik. Az ilyen terjedési módusokat transzverzális mágneses (TM) módusoknak nevezik. A SR-ák frekvenciatartományában ezek közül csak a nulladrendű TM módusnak (más néven transzverzális elektromágneses módus TM_0 , TEM módus) van létjogosultsága, amelyiknek nincsen alsó határfrekvenciája. A magasabb rendű módusok határfrekvenciája jóval a SR frekvenciasáv fölött található. (Az ELF hullámok terjedési módusairól részletesebben a következő, II.5., „*Vertikális elektromos dipólusforrás (távoli) sugárzási tere a Föld-ionoszféra hullámvezetőben*” c. fejezetben esik szó.)

SRT-ek keltéséhez a forráskisülésnek hatékonyan kell sugároznia a TEM módusban, ami vertikális kisülési csatorna esetén teljesül leginkább. Ez is alátámasztja, hogy a SRT-es forrásai többségében felhő-föld kisülések. Ferde, vagy hajlott kisülési csatornák esetén a vertikális szakasz(ok) tekinthető(k) hatékonyabb sugárzónak az alsó ELF tartományban. Hasonlóan alkalmas ELF sugárzók lehetnek vertikális felhővillámok, habár a felhővillámokra inkább a horizontális irányultság jellemző [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 3.1. fejezet].

Összefoglalásképpen azt mondhatjuk, hogy a SRT-eket keltő villámkisülések a leggyakrabban pozitív polaritású felhő-föld villámok, amelyek többnyire egyetlen fővillámból és az azt követő viszonylag hosszabb fennmaradó áramú kisülési szakaszból állnak. A SRT-eket keltő villámok speciális jellegét mutatja, hogy amíg bolygónkon átlagosan 40-50 villámkisülés következik be másodpercenként [Christian et al., 2003], addig a megfigyelések szerint a SRT-ek gyakorisága átlagosan 1-2 esemény percenként.

A SRT-ek forrásvillámainak tulajdonságait szem előtt tartva nem meglepő, hogy ugyanabban a vizsgálatban, amely során Boccippio és munkatársai kimutatták, hogy a vörös lidérceket keltő forrásvillámok többségükben pozitív felhő-föld kisülések, az is kiderült, hogy időbeli egyezés alapján a megfigyelt két vihar fölött észlelt emissziók 95%-a, illetve 78 %-a volt kapcsolható a forrásterülettől több ezer km-re levő rhode islandi SR mérőállomás regisztrátumaiban Q-zavarokhoz [Boccippio et al., 1995]. Riesing és munkatársai a forrásuktól 12 Mm-re, az Antarktiszon működő Palmer állomáson, 0.3-22 kHz-es, széles sávú regisztrátumokban észlelték és azonosították vörös lidérceket keltő villámkisülések lomha végatmoszferikeit az optikai megfigyelések időpontja alapján [Riesing et al., 1996]. A vizsgált időszakban az optikai megfigyelések látóterébe eső, lomha végatmoszferiket

produkáló pozitív felhő-föld villámkisüléseknek azonban csak mintegy 50%-a váltotta ki a felsőlégi emisszió megjelenését is. Erre való tekintettel a szerzők kiemelték a forrásvillámok fennmaradó áramának szerepét a lidércek megjelenésével kapcsolatban, ugyanakkor arra a következtetésre jutottak, hogy a hosszú fennmaradó áram szükséges, de nem elégséges feltétele a lidércek megjelenésének.

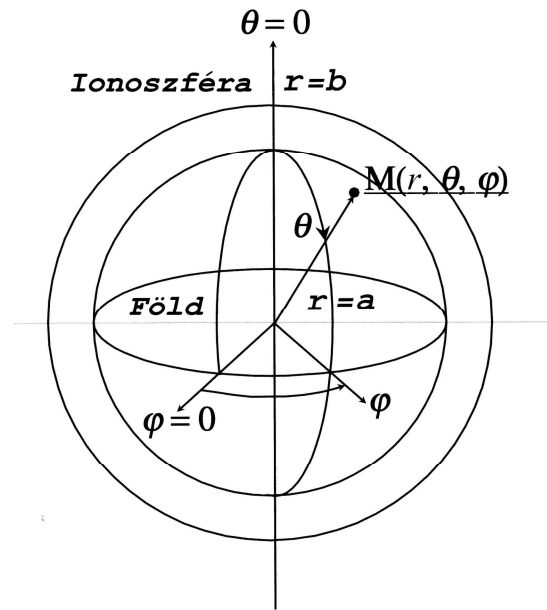
Boccippio és Riesing kutatócsoportjai vizsgálataikkal bebizonyították, hogy a villámkisülések által keltett FEOE-k kialakulásának és a forrásvillám-tulajdonságoknak a kapcsolata a villámkisülések rádiófrekvenciás sugárzását kihasználva az ELF tartomány alsó hányadában távoli észleléssel elemezhető. A vörös lidércek és a SRT-ek kapcsolatát Füllekrug és Riesing későbbi eredményei is megerősítették. Egy Észak-Amerika fölötti megfigyelési kampány ideje alatt az optikai észlelés területén bekövetkező, SRT-et keltő villámkisülések 80%-a idézett elő vörös lidérceket is (a SRT-eket egy németországi ELF mérőállomáson észlelték) [Füllekrug és Riesing, 1998].

II.5. Vertikális elektromos dipólusforrás (távoli) sugárzási tere a Föld-ionoszféra hullámvezetőben

Egy időben változó vertikális elektromos dipólus elektromágneses sugárzási terének leírását az alábbiakban a klasszikus, retardált potenciálok, illetve a Hertz-vektor segítségével való levezetés [Nagy, 1989, 47. fejezet] egy olyan alternatívájának a segítségével adom meg, amely a Föld-ionoszféra hullámvezető gömbhéjszimmetriáját kezdettől figyelembe veszi. Ez a leírás a forrástól távolabb szolgáltat egyszerűbb megoldást a térkomponensek értékeinek és viselkedésének meghatározására, ezért a gyakorlatban főleg a Schumann-rezonancia tranziensek analizálásánál alkalmazzák. A tér megadásánál Nyikolajenko és Hayakawa tárgyalását követem [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 2. fejezet], de csak a fontosabb paraméterek értelmezéséhez szükséges formulákat adom meg, egyébként a levezetés logikai lépéseinek a követésére szorítkozom.

Mivel az elektromágneses hullámok terjedését befolyásoló szinte valamennyi paraméter a frekvencia függvénye, célszerű a térkomponensek kifejezését is a frekvencia függvényében megadni. A rendszer szimmetriájához igazodva gömbi koordináta-rendszerben dolgozunk és a forrást az egyik pólusba, a Föld felszínére helyezzük $\{r=a, \theta=0 \text{ (észak)}, \varphi=0 \text{ (Greenwich-i meridián)}\}$, ahol a a Föld sugara. A figyelembe veendő tulajdonságokkal rendelkező hullámvezetőben a forrástól származó elektromágneses teret egy ideális, végtelen

vezetőképességű felületekkel határolt gömbhéj elektromágneses sajátfüggvényeinek a sorfejtéseként állítjuk elő, ahol a felső határfelület (gyakorlatilag az ionoszféra) magasságát a $b > a$ paraméterrel jellemezzük (11. ábra).



11. ábra

Gömbi koordinátarendszer vertikális elektromos dipólusforrás elektromágneses terének leírásához.

Ha gömbi koordinátarendszerben a különböző térkomponenseket mint általános vektorkomponenseket ($E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$) elektromos, illetve mágneses skalárpotenciálok (Debye potenciálok) segítségével fejezzük ki, minden térkomponens formulája két tag összegéből áll, amelyek közül az egyik csak az elektromos potenciáltól függ, a másik pedig csak a mágneses potenciáltól. Ez azt jelenti, hogy a skalárpotenciálok alakjától függetlenül úgy az elektromos, mint a mágneses tér mindig kétféle térösszetevő összegeként írható fel: a kizárólag elektromos skalárpotenciállal kifejezett térkomponensek által, illetve a kizárólag mágneses skalárpotenciállal kifejezett térkomponensek által meghatározott terek összegeként. Az elektromos skalárpotenciállal felírható térösszetevő sajátossága, hogy benne a radiális mágneses komponens zérus, ezért ezt transzverzális mágneses (TM) térösszetevőnek szokás nevezni. Ezzel szimmetrikusan a mágneses skalárpotenciállal kifejezett térösszetevőből a radiális elektromos komponens hiányzik, ezt pedig transzverzális elektromos (TE) térösszetevőnek nevezik.

A különböző térkomponensek Debye potenciálokkal kifejezett formuláit használva felírhatjuk a Maxwell-egyenleteket, amelyek – tekintettel arra, hogy szabad rezgések jellemzőit számoljuk – most nem tartalmaznak forrástagokat. A gömbi koordinátarendszerben felírt vektoriális differenciálegyenletek a három elektromos és három mágneses térkomponens

szerint hat (csatolt) komponens-egyenletre bomlanak, viszont az egyes térkomponensekben az elektromos és mágneses skalárpotenciált tartalmazó tagok elkülönülése miatt a hat egyenlet az elektromos és a mágneses potenciálra két azonos alakú, független hullámequationre egyszerűsödik. Ezek az egyenletek a változók szétválasztásának a módszerével megoldhatók, azaz az általános megoldást a gömbi koordinátáktól egyenként függő tényezők szorzatának alakjában keresve az egyes tényezőkre külön egyenletek írhatók fel.

A θ koordinátára vonatkozó egyenlet megoldásai Legendre és asszociált Legendre polinomok, amelyek a φ -re vonatkozó megoldással együtt a felszín mentén ortogonális bázisfüggvényrendszert alkotnak (ún. tesszerális harmonikusok). Az r koordinátára felírható egyenlet megoldásai gömbi Hankel függvények, amelyek radiális irányban kifelé, illetve befelé haladó hullámokat írnak le. A potenciálok hullámequationének egyenként megoldásai a tesszerális harmonikusok és a Hankel függvények szorzatai, az általános megoldás pedig a szorzatok összes megengedett variációjának a lineáris kombinációja. A lineáris kombináció minden egyes szorzattagjának megfelelő elektromos, illetve mágneses Debye potenciálból egy TM és egy TE tőrosszetevő származtatható, amelyeket TM, illetve TE hullámoknak neveznek. Ezek közül az ideális gömbhéjrezonátor elektromágneses sajátfüggvényei, más néven rezgési módusai azok a hullámok, amelyek térkomponensei teljesítik a vezető határfelületeken való viselkedés törvényeit és ezenkívül kielégítik a Sommerfeld-féle sugárzási feltételt, amely szerint a külső határfelületen kívül (azaz az ionoszférában) csak radiális irányban kifelé terjedő hullámok fordulhatnak elő. A SRT-ek frekvenciatartományában a forrástól nagyobb távolságra ($>1-2$ Mm) ezeknek a feltételeknek csak TM hullámok felelnek meg, így ezeket alkalmazhatjuk a továbbiakban.

A következő lépésben már a vizsgálandó hullámvezetőben írjuk fel Maxwell egyenleteit, amelyekben a térkomponenseket a fentiekben bevezetett TM rezgési módusok lineáris kombinációjával fejezzük ki. A feladat a lineáris kombinációs együtthatók meghatározása oly módon, hogy a velük előállított elektromágneses tér kielégítse az aktuális peremfeltételeket. Ez a módszer nemcsak vertikális elektromos dipólusforrás elektromágneses terének a számítására alkalmas, hanem különböző ionoszférikus vezetőképességi profilok, illetve inhomogenitások hatásainak a tárgyalására is használható [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 2.7. fejezet].

Egy pólusba helyezett vertikális elektromos dipólusforrás esetén a tér nem függ a φ koordinátától, így a TM rezgési módusok mindössze az E_r , E_θ és H_φ térkomponensekben lesznek zérustól különbözők. Ráadásul az E_θ komponens kb. 4 nagyságrenddel kisebb, mint az E_r [Polk, 1982], ezért gyakorlatilag elhanyagolható. Az olyan TM hullámokat, amelyekben

a vertikális mágneses komponense mellett laterális elektromos térkomponensek sincsenek, transzverzális elektromágneses (TEM) hullámoknak nevezik. Tekintettel arra, hogy itt még az E_θ térkomponens is zérustól különböző, ugyanakkor az amplitúdója nagyon kicsi, a vertikális elektromos dipólus által gerjesztett sajátrezgéseket kvázi-TEM, vagy Q-TEM módusoknak hívják.

Az ionoszféra tulajdonságait első lépésben egy skaláris, frekvenciától függő felületi impedanciafüggvénnyel ($Z(\omega)$) vehetjük figyelembe, amely az ionoszférikus plazma dielektromos állandóján keresztül az ütközési frekvencia és a plazmafrekvencia függvénye. A határfeltételekre felírható egyenletek így lényegesen leegyszerűsödnek és a TEM módusok lineáris kombinációs együtthatói viszonylag egyszerűen előállíthatók. A két domináns térkomponensre a következő kifejezés adódik:

$$E_r(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-i}{4\pi \varepsilon_0 h a^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1) \left[\omega - \frac{icZ(\omega)}{h} \right]}{\omega_n^2 - \omega^2 + \frac{ic\omega Z(\omega)}{h}} P_n(\cos \theta)$$

$$H_\varphi(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-1}{4\pi \varepsilon_0 \mu_0 h a^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{\omega_n^2 - \omega^2 + \frac{ic\omega Z(\omega)}{h}} P_n^1(\cos \theta)$$

A kifejezésekben $M_I(\omega)$ a forrás árammomentum-spektruma (az I index jelöli az áramerősséget), $i = \sqrt{-1}$ az imaginárius egység, ε_0 és μ_0 a vákuum dielektromos állandója és permeabilitása, a a Föld sugara, h az ionoszféra alsó határrétegének a magassága a földfelszíntől mérve, c a fénysebesség. $Z(\omega)$ az alsó ionoszféra frekvenciafüggő, skaláris felületi impedancia függvénye, P_n és P_n^1 n -ed rendű Legendre és asszociált Legendre polinomok, ω_n az n -edik TM rezgési módus sajátfrekvenciája az ideális gömbhéjúregben, θ pedig a forrás és az észlelő szögtávolsága a mindkettőjüket tartalmazó gömbi főkörön. A tesszerális harmonikusok φ koordinátától független részhalmazát zonális harmonikusoknak nevezik, ezért a fenti formulákat a vertikális elektromos dipólus terének zonális harmonikusok szerinti kifejtéseként (zonal harmonic series expansion, ZHSE) is emlegetik (12. ábra, a következő oldalon).

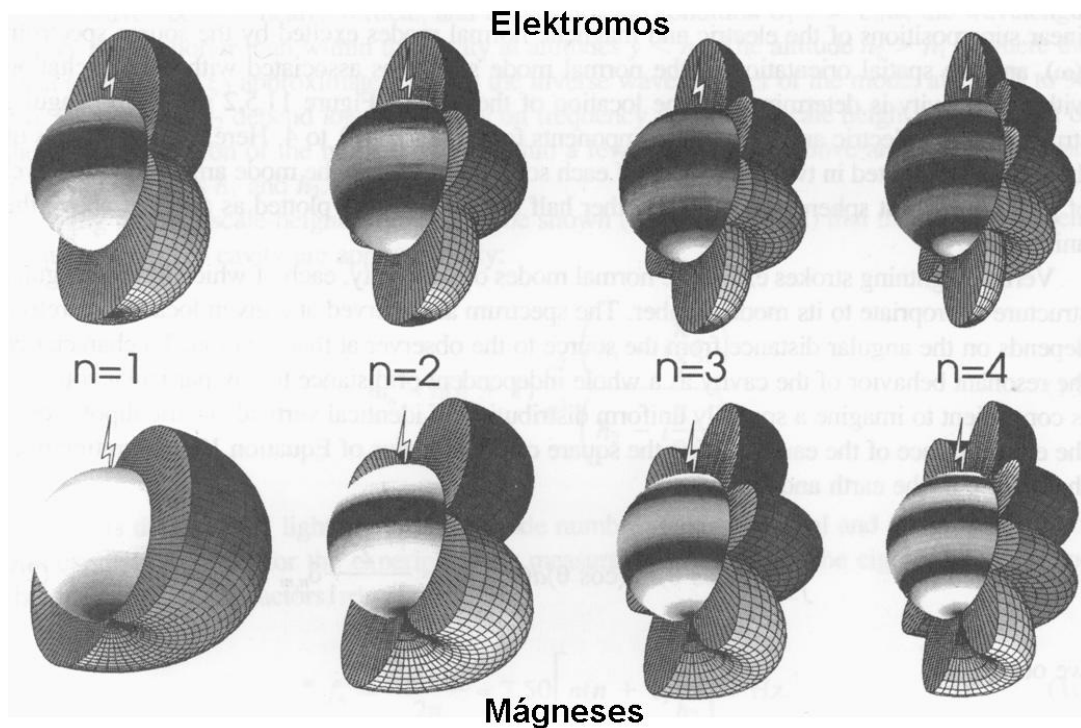
A hullámok terjedését befolyásoló faktorok figyelembevételének egy alternatívájaként a felületi impedancia helyett egy dimenzió nélküli, viszont a frekvenciától függő, komplex terjedési paraméter (propagation parameter, $\nu(\omega)$) is használható. A felületi impedanciával, illetve a terjedési paraméterrel való leírás között a következő összefüggés teremt kapcsolatot:

$$\omega^2 - \frac{i\omega c Z(\omega)}{h} = \left(\frac{c}{a}\right)^2 \nu(\omega)[\nu(\omega)+1]$$

Figyelembe véve továbbá, hogy az ideális gömbhéjüregben a sajátfrekvenciák értéke $\omega_n^2 = \left(\frac{c}{a}\right)^2 n(n+1)$, a vertikális elektromos dipólus domináns térkomponenseinek zonális harmonikusok szerinti kifejtése az alábbi alakra hozható:

$$E_r(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-i}{4\pi \varepsilon_0 h a^2} \frac{\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1) - \nu(\omega)[\nu(\omega)+1]} P_n(\cos \theta)$$

$$H_\varphi(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-1}{4\pi h a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1) - \nu(\omega)[\nu(\omega)+1]} P_n^1(\cos \theta)$$



12. ábra: Vertikális elektromos dipólus vertikális elektromos, illetve horizontális mágneses terének zonális harmonikusok szerinti sorfejtésében szereplő első négy TEM tag amplitúdóeloszlása. A vertikális elektromos dipólusforrás helyét villámszimbólum jelzi. Az amplitúdóeloszlást a gömbfelületek bal oldalán szinkód jelöli: a világosabb területek feletti amplitúdók nagyobbak [Sentman, 1995, Figure 11.5.2.].

A terjedési paraméter használatának előnye, hogy egyetlen függvénnyel a hullámok terjedését befolyásoló valamennyi faktor hatását figyelembe lehet venni és a fenti kifejezések mérési eredményekre történő illesztésével a terjedési paraméter közvetlenül is meghatározható. Több, különböző paraméterkészletű modelltől származtatható a mérési eredményekkel jól egyező $\nu(\omega)$ függvény; a fenti levezetésben az ionosféra felületi impedanciájának segítségével való származtatás csak egy példa a sok közül. Ezeknek a különböző modelleknek a tágabb érvényessége, illetve abszolút pontossága a SR-ák frekvenciatartományában a mérések korlátozott felbontóképessége miatt nem mindig

ellenőrizhető. A terjedési paraméterfüggvény néhány lehetséges előállítási módja megtalálható [Nickolaenko és Hayakawa, 2002] 4.1.3. fejezetében. Ezek közül kiemelem Jones modelljét [Jones, 1970a], amelyben a terjedési paraméter a hullámok kísérletileg is mérhető frekvenciafüggő csillapításának és fázissebességének a függvénye:

$$\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]=\left(\frac{\omega a}{c}\right)^2\left[\frac{c}{V(\omega)}-i5.49\frac{2\pi\alpha(\omega)}{\omega}\right]^2$$

A kifejezésben $V(\omega)$ az ELF hullámok frekvenciafüggő fázissebessége, $\alpha(\omega)$ pedig az ugyancsak frekvenciafüggő csillapítási együttható. A fázissebesség és a csillapítási együttható frekvenciafüggésére Ishaq és Jones adott heurisztikus formulákat [Ishaq és Jones, 1977]:

$$\frac{c}{V(\omega)}=1.64-1.1759\log\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)+0.01791\left[\log\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)\right]^2 \text{ és}$$

$$\alpha(\omega)=0.063\left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^{0.63}.$$

Ezek a formulák több mért, valamint néhány (a mérésekkel jól egyező) modell ionoszférikus vezetőképességi profil átlagából levezett fázissebesség és csillapítási együttható függvényre [Jones, 1967] illesztett görbéket írnak le.

A vertikális elektromos dipólus elektromágneses terének egy másik megközelítése Sentman nevéhez fűződik, aki a Greifinger házaspár ionoszféramodelljének felhasználásával határozta meg a rezonátor sajátfrekvenciáit és a zonális harmonikusok sorfejtési együtthatóit ezek segítségével fejezte ki [Sentman, 1990]. A Greifinger modell két karakterisztikus ionoszféra magassággal veszi figyelembe az elektromos és a mágneses tér eltérő viselkedését az ionoszféra alsó határfelületén és így magyarázza a terjedési paraméter frekvenciafüggését [Greifinger és Greifinger, 1978].

A domináns térkomponensek zonális harmonikusok szerinti sorfejtése abszolút konvergens [Nickolaenko és Rabinowitz, 1974], de lassan konvergál és akár többszáz tag figyelembevételére is szükség van a kívánt pontosság eléréséhez. Napjaink számítógépeinek ez nem okoz gondot, de régebben több matematikai közelítést is kipróbáltak a konvergencia gyorsítása érdekében [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 4.1.4. fejezet]. Wong 1996-ban összehasonlította a Jones / Ishaq és Jones modellt Sentmanéval, valamint mindkettőt néhány gyorsított konvergenciájú eljárásból kapott eredménnyel [Wong, 1996]. Megállapította, hogy a Jones / Ishaq és Jones modellből és Sentman modellből számított térkomponensek kb. 35 Hz-ig jó egyezést mutattak, viszont 35 Hz fölött az eredmények elkülönültek. A különbség annak tulajdonítható, hogy Sentman modelljében a rezonátor jósági tényezője állandó. Ez

ellentmond a tapasztalatoknak [Mushtak és Williams, 2002]. Korrigált jósági tényezők alkalmazásával a Sentman modell a Jones / Ishaq és Jones modellel jól egyező eredményeket adott a SR-ák teljes frekvenciatartományában. A gyorsabban konvergáló, közelítő formulákból kapott térfüggvények elsősorban a forrás közelében különböztek a Jones / Ishaq és Jones modellből számítottaktól, ami nem meglepő, mivel az eredeti sorfejtés lassú konvergenciája az elektromágneses tér forrásánál levő szingularitásával van összefüggésben.

A dolgozatomban elvégzett vizsgálatoknál a leginkább realisztikus térjellemzőket szolgáltató Jones / Ishaq és Jones modellt alkalmaztam és a térkomponenseket a zonális harmonikus sorfejtéssel közelítések nélkül számoltam.

A vertikális elektromos dipólus domináns térkomponenseinek terjedési paraméterrel felírt zonális harmonikusok szerinti kifejtése más úton is adódik. A fenti levezetésben az ideális rendszerben fennálló elektromágneses tér Debye potenciáljaira kapott általános megoldás laterális irányokban állóhullámokat (tesszerális harmonikusok), míg radiális irányban terjedő hullámokat (Hankel függvények) tartalmazott. Lokalizált gerjesztés esetében azonban realisztikusabb radiális irányban álló, ugyanakkor a gömbhéj felülete mentén terjedő hullámokban gondolkodni. A laterálisan állóhullámokat, radiálisan terjedő hullámokat tartalmazó általános megoldás a Watson transzformáció felhasználásával radiálisan állóhullámokat, míg laterálisan terjedő hullámokat tartalmazó, szintén lineáris kombináció alakjában felírható megoldássá alakítható [Watson, 1918; Wait, 1962, 1970, 1996]. Az új lineáris kombináció mindegyik tagjának megfelelő Debye potenciálból szintén TM, illetve TE térösszetevők vezethetők le, amelyeket terjedési módusoknak neveznek. A terjedési módusokban energia tartósan általában csak egy adott határfrekvencia fölött létezhet. Ez alól csak a nulladrendű TM terjedési módus (TM_0) kivétel, amelynek nincsen határfrekvenciája. Valójában minden más terjedési módus határfrekvenciája a SR frekvenciatartomány fölött van, ezért az várható, hogy a forrástól távolabb az energia csak ebben a legalsó terjedési módusban koncentrálódik. A terjedési módusok lineáris kombinációs együtthatói, illetve ebben az esetben az egyetlen együttható annak a követelménynek a segítségével határozható meg, hogy a potenciálnak a forrás felé közeledve a forrás által meghatározott alakú függvénybe kell átmennie. Vertikális elektromos dipólusforrás esetén a domináns térkomponensekre következő kifejezések adódnak [Wait, 1962, 1970, 1996]:

$$E_r(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{i}{4\varepsilon_0 h a^2} \frac{\nu[\nu+1]}{\omega} \frac{1}{\sin(\pi\nu)} P_\nu(-\cos\theta)$$

$$H_\varphi(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-1}{4 h a} \frac{1}{\sin(\pi\nu)} P'_\nu(-\cos\theta)$$

A fenti kifejezésekben ν a terjedési módusokhoz tartozó sajátértékként jelenik meg, ami komplex és frekvenciafüggő ($\nu = \nu(\omega)$). A kifejezésben így a Legendre és asszociált Legendre polinomok fokszáma is komplex. A komplex foks számú polinomok valós foks számú polinomokkal kifejezhetők:

$$P_{\nu}^m(-\cos\theta) = (-1)^{m+1} \frac{\sin(\pi\nu)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)-\nu(\nu+1)} P_n^m(\cos\theta)$$

Ezt a kifejezést a domináns térkomponensek formuláiba helyettesítve és figyelembe véve, hogy $P_n = P_n^0$, pontosan a zonális harmonikusok szerinti sorfejtést kapjuk.

II.6. A FEOE-k forrásvillámainak ELF-VLF észlelések alapján meghatározott töltésmomentum-változása

A villámkisülésekhez köthető FEOE-k, de különösen a vörös lidércek kialakulásához szükséges tekintélyes, kvázi-állandó elektromos tér nagy (vertikális) töltésmomentumú felhő-föld villámkisülések után tud a leggyakrabban kialakulni. A nagy töltésmomentumot eredményező töltésáramlás csak ritkán tud végbemenni a fővillámban, amelyben az áramerősség maximuma (ún. csúcsáram) az esetek kb. 50%-ában meghaladja ugyan a 30 kA-t, azonban ennek a kisülési szakasznak az időtartama a kevésbé impulzív pozitív polaritású villámok esetén is legfeljebb néhány tized ezredmásodperc [Uman, 1987, 7.2.2 fejezet]. A töltésmomentum értékét jellemzően meghatározó kisülési szakasz gyakrabban a fennmaradó áram, amelyben az áramerősség „csak” 100 A-es nagyságrendű, ellenben az időtartama többszáz ezredmásodperc is lehet [Uman, 1987, 11. és B.4 fejezet].

A kisülés fennmaradó áram szakasza leginkább az ELF tartományban sugároz, míg a fővillám gyakorlatilag a teljes rádiófrekvenciás tartományban, de 10 kHz körül a legintenzívebben [Uman, 1987, 7. fejezet; Wait, 1960]. Távoli észlelés esetén a hullámvezető frekvenciafüggő csillapítása miatt [Harth, 1982] az intenzívebb villámkisülések jelei is csak az ELF-VLF tartományban, kb. 10 Mm-nél távolabbi forrás esetén pedig legfeljebb az ELF tartomány alsó hányadában a SR tartományban észlelhetők, illetve értékelhetők ki.

A forráskisülés töltésmomentum-változását a SRT-seknek a domináns vertikális (radiális) elektromos (E_r) és horizontális mágneses (H_{ϕ}) térkomponensekben rögzített adatsoraiból a zonális harmonikusok szerinti sorfejtés

$$E_r(\omega, \theta) = M_I(\omega) \left[\frac{-i}{4\pi \varepsilon_0 h a^2} \frac{\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]}{\omega} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)-\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]} P_n(\cos \theta) \right]$$

$$H_\varphi(\omega, \theta) = M_I(\omega) \left[\frac{-1}{4\pi h a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)-\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]} P_n^1(\cos \theta) \right]$$

formuláinak a segítségével lehet meghatározni. ($M_I(\omega)$ a forrás árammomentum-spektruma, $i = \sqrt{-1}$ a képzetes egység, ε_0 a vákuum dielektromos állandója, a a Föld sugara, h az ionoszféra alsó határrétegének a magassága a földfelszíntől mérve, $\nu(\omega)$ a (kör)frekvenciától függő, komplex terjedési paraméter, P_n és P_n^1 n -ed rendű Legendre és asszociált Legendre polinomok, θ pedig a forrás és az észlelő szögtávolsága a mindkettőjüket tartalmazó gömbi főkörön.) Ezek úgy is tekinthetők, hogy a baloldalon szereplő térkomponensek a jobboldalon az árammomentum-spektrumnak és a Föld-ionoszféra hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válaszspektrumának a szorzataként állnak elő. A térkomponensek mért spektrumainak és a Föld-ionoszféra hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válaszspektrumának a hányadosa a forrás árammomentum-spektrumát adja. A Föld-ionoszféra hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válaszspektruma a számításokban modellekből származó elméleti függvénnyel közelíthető. Az árammomentum időbeli változása a spektrum inverz Fourier-transzformációjával előállítható, a töltésmomentum pedig pl. az árammomentum integrálásával kiszámítható. (A töltésmomentum előállításának további lehetőségeit a III.9., „A forrás vertikális árammomentum-spektrumának és töltésmomentum-változásának meghatározása” c. fejezetben részletesen tárgyalom.) A forrás árammomentuma az időtartományban is előállítható közvetlenül a térkomponensek mért idősoraiból a Föld-ionoszféra hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válasz-idősorával való dekonvolúcióval, ami a frekvenciatérbeli osztás ekvivalens művelete [Smith, 1997].

A VLF tartományban a töltésmomentum meghatározása hasonlóképpen történik, azonban a hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válaszában előállítására más módszereket alkalmaznak a VLF hullámok eltérő terjedési tulajdonságai miatt. Ezeknek a módszereknek az ismertetése túlmutat ennek a dolgozatnak a keretein. Az érdeklődő olvasó az eljárások kimerítő összefoglalását találhatja Steven Cummer doktori értekezésében [Cummer, 1997].

Cummer és Inan vörös lidércek optikai megfigyeléseiből, illetve a helyi villámfigyelő hálózat adatai alapján meghatározott forrás-észlelő távolságnál a Föld-ionoszféra hullámvezető impulzusgerjesztésre adott válaszában az idősorát állították elő a horizontális mágneses térkomponensben spektrális komponensek összegeként az 1-1500 Hz-es frekvenciasávban. A forrás vertikális árammomentumának idősorát a mért horizontális

mágneses idősoroknak a modellezett impulzusválasszal való dekonvolúciójával állították elő, a töltésmomentum-változást pedig szintén az időtartományban, integrálással határozták meg [Cummer és Inan, 1997; Cummer és Inan, 2000; Cummer, 2006]. Az eljárás előnye, hogy kb. ezredmásodperces időbeli felbontással követhető az árammomentum változása és így az emisszió keletkezési időpontjához tartozó töltésmomentum-érték is megadható. Az első vizsgálat során 6 vörös lidércet keltő kisülés esetében 25 C·km és 3250 C·km közötti kritikus töltésmomentum változást találtak a kisülések első 5 ms-a alatt.

A modellezett impulzusválaszok és a mért mágneses idősorok eltérései, továbbá a vörös lidércekben folyó áramokra vonatkozó elméleti számítások [Sukhorukov és Stubbe, 1997] arra utaltak, hogy maguk a lidércek is lehetnek mérhető ELF sugárzás forrásai. Ezt a levezetett árammomentumok idősorának és a vörös lidércek észlelési időpontjának összevetése a vörös lidérc észlelések kb. 10%-ban meg is erősítette [Cummer et al., 1998; Cummer, 2003]. A tapasztalatok szerint a vörös lidércek töltésmomentum-változása egyes esetekben az 1200 C·km-t is meghaladhatja.

Hu és munkatársai 76 vörös lidérc forrásvillámának jól feldolgozható ELF jelét elemezve azt tapasztalták, hogy a vörös lidérc kialakulásának valószínűsége 600 C·km alatti vertikális forrástöltésmomentum-változás esetében kevesebb, mint 10%, 1000 C·km-esnél nagyobb villámkisülés esetében viszont 90%, 1400 C·km felett pedig gyakorlatilag egységnyi, ha ezek a töltésmomentum változások 6 ms-nál kevesebb idő alatt következnek be. A kritikus töltésmomentum az általuk vizsgált esetekben 120 C·km és 2080 C·km között mozgott, a leggyakoribb érték 800 C·km körüli volt. Megfigyelték ezenkívül, hogy ELF sugárzást is produkáló vörös lidércek kialakulása csak 1400 C·km-es, vagy ennél nagyobb töltésmomentumú forráskisülések esetén valószínű. Abból, hogy meglehetősen alacsony töltésmomentumú villámkisülések után is kialakulhattak vörös lidércek, a szerzők arra következtettek, hogy valószínűleg nem kizárólag a felsőléggöri kvázi-stacionárius elektromos tér magnitúdója határozza meg ennek az emisszió típusnak a megjelenését [Hu et al., 2002].

A forráskisüléstől származó lomha végeatmoszferik és az azt követő alacsonyfrekvenciás, vörös lidérctől származó jellegzetes hullámforma alapján széles frekvenciatartományú (1 Hz – 250 kHz) regisztrátum idősorában nappali vörös lidérc eseményeket is sikerült azonosítani, amelyeket optikailag az erős napfény miatt lehetetlen lett volna észlelni [Stanley et al., 2000]. A nappali emissziók kialakulása az alacsonyabb alsó ionoszférikus határréteg miatt alacsonyabban, kb. 54 km-es magasságban indult meg, ami a nagyobb légsűrűség miatt számottevően magasabb, 3900-6100 C·km-es kritikus

forrástöltésmomentum-változást igényelt. Eközben a mérések szerint csak a vörös lidércekben is 910-2100 C·km töltésmomentum-változás ment végbe.

A fenti technika alkalmazásának a SR frekvenciák tartományában korlátot szab, hogy a lomha végatmoszferik hullámformája nem rekonstruálható kielégítően az időtartományban kizárólag az 50-60 Hz alatti frekvenciakomponensekből. Alacsony frekvencián, kisebb sáv szélességnél a forrásfolyamatok változása kisebb időbeli felbontással képeződik le. Ez a felbontás 50 Hz alatt 20 ms alá csökken, ami az esetek többségében hosszabb, mint a vörös lidércek forrásvillámtól való időeltolódása [Cummer, 2003; Cummer, 2006]. A SRT-ekből ezért többnyire nem állapíthatók meg a forrás sugárzásának rövidebb időskálájú változásai és vörös lidérctől származó sugárzás általában nem különíthető el. A SRT-ek analiziséből a forrás teljes (vertikális) árammomentum-változása becsülhető a felsőlégköri emissziótól származó esetleges hozzájárulással együtt.

Huang és munkatársai a frekvenciatérben maradva a forrás vertikális árammomentum-spektrumából vezették le a töltésmomentum-változást [Huang et al., 1999]. Észak-Amerika fölött megfigyelt 46 vörös lidérc és 17 gyűrűlidérc forráskisüléseinek SRT-eit elemezték. Vörös lidércek esetén 300 C·km és 2500 C·km között változó teljes töltésmomentum változást találtak, a leggyakoribb érték 500 C·km körüli volt (89. oldal, 33.e ábra). Gyűrűlidércek forráskisüléseit is vizsgálták, de ezeknél nem találtak nyilvánvaló alsó töltésmomentum határértéket. A legnagyobb töltésmomentum-változás 1500 C·km volt, az eloszlás maximuma pedig itt is 500 C·km-re esett. A források árammomentum-spektrumai vörös lidércekhez tartozó eseményeknél 8 Hz környékén karakterisztikusan magasabb amplitúdókat mutattak, a gyűrűlidércek esetében azonban egyenletesebb amplitúdók voltak jellemzők, ami a gyűrűlidércek forrásainak impulzívabb jellegére utal.

Hobara és munkatársai a Japán-tenger fölött, a téli zivatarok villámkisülései által keltett vörös lidércek (21 db) és gyűrűlidércek (22 db) forrásainak tulajdonságait vizsgálták az ELF sávban, szintén a frekvenciatérben. A forrásvillámok ELF sugárzását a forrásterületől kb. 1 Mm távolságban levő Moshiri állomáson észlelték 1-800 Hz között. A töltésmomentum-változásokat illetően Hu és Huang észak-amerikai FEOE észlelésekkel kapcsolatban kapott eredményeinél kisebb szórást mutató értékeket (125-900 C·km) kaptak [Hobara et al., 2001]. A leggyakoribb töltésmomentum-változás (500 C·km körüli) jóval alacsonyabb volt, mint Hu vizsgálatainál nyári, kontinentális vörös lidércek esetében, másrészt jól egyezett Huang által tapasztalt maximummal (ugyancsak nyári, kontinentális emissziók). A Japán közelében talált eredményeket ugyanazon forrásterület fölött további megfigyelésekből származó adatok is

megegyeztettek (130-1600 C·km, leggyakoribb érték 500 C·km körül) [Matsudo et al., 2007] (89. oldal, 33.f ábra).

A fejezetben ismertetett eredményekkel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy a kiszülő töltéscentrum földfelszín alatti tükörpárjának töltésmomentum-változását nem tartalmazzák.

A FEOE-k és a SRT-sek, illetve Q-zavarok közötti szoros összefüggés, figyelembe véve a vörös lidércek kialakulásának ismert valószínűségét a forrás polaritásának és töltésmomentumának függvényében lehetőséget nyújt ezen emissziók globális előfordulási gyakoriságának becslésére. Sato és Fukunishi szintén az antarktiszi Syowa állomás adatait felhasználva átlagosan 30-ra becsülte az óránként kialakuló vörös lidércek számát az észlelt Q-zavarok tulajdonságai alapján [Sato és Fukunishi, 2003]. Ez az eredmény a módszer bizonytalanságait is figyelembe véve kiválóan egyezik a későbbi műholdas megfigyelésekből származó kb. 30-60 esemény/óra értékkel [Hsu et al., 2009; Chen et al., 2008], és így a távoli észlelésekből levezetett töltésmomentumok általános érvényességét mutatja.

III. SRT-ek regisztrálása és feldolgozása a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban

A légköri elektromágneses tér ELF sávú megfigyelése Magyarországon jelenleg egyedül a Magyar Tudományos Akadémia Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetének Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban folyik. Ebben a fejezetben bemutatom az ELF mérőrendszert és az adatgyűjtés módszerét, majd ismertetem az obszervatóriumban regisztrált SRT-ek feldolgozásánál alkalmazott eljárást.

III.1. Mérőrendszer és adatrögzítés

A légköri elektromágneses tér ELF tartományba eső elektromágneses hullámainak a megfigyelésére Ádám Antal és Bencze Pál tettek először kísérletet a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban Nagycenk és Fertőboz határában [47.6° K, 16.7° É]. Hosszú,

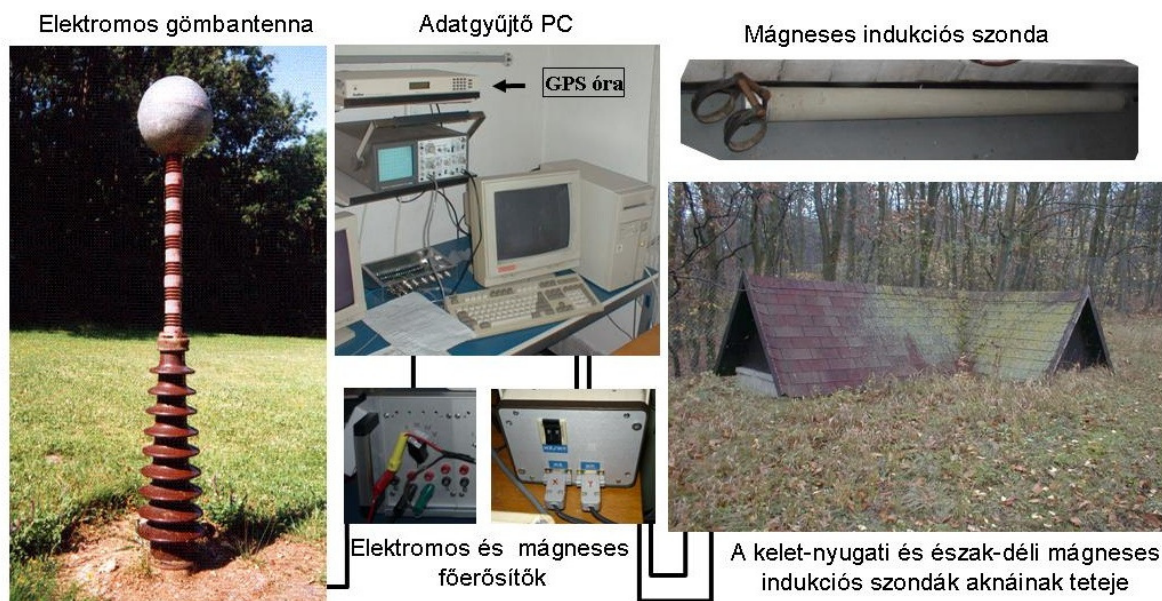
horizontális drót antennát alkalmaztak (L antenna), és 8, 21, valamint 86 Hz-en végeztek keskenysávú méréseket. Az erősítő berendezést egy hordozható szeizmikus mérőrendszerből adaptálták. Az egyes frekvenciasávokban megfigyelték a különböző zavarok előfordulásának, hosszának, amplitúdójának és periodicitásának a napi alakulását és kiemelték a 8 és 21 Hz-es zavarok tulajdonságainak különbözőségét a 86 Hz-es jelektől. Az eltéréseket az alacsonyabb és magasabb frekvenciájú jeleknek az ionoszférával való különböző kölcsönhatásával magyarázták [Ádám és Bencze, 1963].

Az 1980-as években Satori Gabriella kezdeményezte a Schumann-rezonancia mérések felújítását, egy új mérőrendszer tervezését, lehetővé téve a háttér Schumann-rezonancia frekvenciák és amplitúdók folyamatos megfigyelését. A kísérleti méréseket követően, 1993-tól működik folyamatosan az új SR mérőrendszer, amely a vertikális elektromos térkomponensben az első három SR módus csúcsfrekvenciáját és amplitúdóját méri. A mérőrendszer eredeti felállításban egy 2.4 m magas masszív szigetelő tartóoszlopon álló, 40 cm átmérőjű öntött gömbantennából, elő- és főerősítőből, valamint az adatok digitalizálására és rögzítésére szolgáló, analóg/digitális átalakítóval felszerelt számítógépből állt [Satori et al., 1996]. Az akkori konfigurációt 1997-ben a horizontális mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati komponenseinek a mérésére alkalmas mágneses indukciós szondákkal és az ezeket kiszolgáló elő- és főerősítőkkel egészítették ki (13. ábra, a következő oldalon). A SR-ák egyaránt megfigyelhetők a légköri EM tér elektromos és mágneses térkomponenseiben, de a rezonanciamintázat ezek közül a vertikális elektromos, valamint a horizontális mágneses térkomponensek spektrumaiban észlelhető a legkönnyebben [Polk, 1982]. A megfelelően tájolt indukciós szondákat a kapacitív gömbantennától kb. 100 méterre, a földfelszín alatt kb. 1 méterrel, homokágyon álló beton csatornában helyezték el. A rendkívül érzékeny antennák így védettek a földkéreg enyhe szeizmológiai aktivitásával, illetve az időjárási eseményeknek (pl. erős szél) a fák gyökerei által a talajba közvetített mikrorezgéseivel szemben. Az antennák és az erősítők az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetében készültek.

1998-ban az észlelőrendszer része lett egy GPS időjelek vételére és az idősorok felvételi idejének rögzítésére alkalmas egység is (Symmetricom XL-AK GPS True Time Clock + PC interfész kártya). Innentől kezdve folyik az obszervatóriumban az első három háttér SR módus rezonanciaamplitúdójának és csúcsfrekvenciájának a rögzítése mellett a SRT-ek idősorainak a regisztrálása is.

Kezdetben a mérési adatok valós idejű megfigyelése mellett csak akkor történt meg az idősorok tárolása, ha az elemző algoritmus tranziens esemény észlelését érzékelte. Az adattárolási technika fejlődésével nagyobb kapacitású adathordozók is elérhetővé váltak és ez

lehetővé tette, hogy 2004 júliusától az idősorok rögzítése kvázi-folytonos legyen, így az információvesztés minimálisra csökkent [Sátori, 2007].



13. ábra

A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer részei és bekötésük vázlata.

Mind az elektromos, mind a mágneses mérőrendszer átviteli tartománya gyakorlatilag az 5-30 Hz-es frekvenciasáv. A környék településeit ellátó elektromos közüzemi hálózathoz, valamint az obszervatórium méréseit kiszolgáló vezetékekből származó mesterséges elektromágneses sugárzás kiszűrésére valamennyi erősítőfokozatba lyukszűrők kerültek 50 Hz-nél és ennek felharmonikusainál. Bár ez a frekvencia kívül esik a fő érzékenységi tartományon, a sugárzás olyan erős, hogy a spektrális csúcsok széleiből beszivárgó energia szűrés hiányában így is telítené a műszerek mérési tartományát. A néhány Hz és 50-60 Hz közé eső SR frekvenciasávot felülről ez az 50 Hz-es (máshol, pl. az USA-ban 60Hz-es) veszteségi sugárzás [Sentman, 1995, chapter 4.1.2, 278. old.], alulról a geomágneses eredetű PC1 mikropulzációk tartománya [Sentman, 1995, chapter 4.1.1, 277. old.] fogja közre. Mindkét jeltípus amplitúdója nagyságrendekkel meghaladja a SR-ákét. A SR-ák és SRT-ek valójában csupán kicsiny perturbációi a kvázi-stacionárius légköri EM térnek, amely tiszta időben kb. 130 V/m (=130000 mV/m) a földfelszín közelében [Rycroft et al., 2008]. A vertikális elektromos térkomponensben a háttér ELF rádió zaj jelszintje ehhez képest csak néhány mV/m [Price et al., 2007], aminek a SRT-ek maximális amplitúdója átlagosan kb. 10 szerese. Hasonlóképpen a horizontális mágneses térkomponensben az ELF háttér jelszint pT nagyságrendű [Price et al., 2007], amely töredéke a horizontális irányban kb. 2.5×10^5 – 4.2×10^7 pT nagyságú geomágneses térnek a föld felszínén [IAGA VMOD, 2005].

A mágneses mérőrendszer az 50 Hz-es sugárással kapcsolatos szűrők mellett egy további, 16.66 Hz-en centrált, ki/bekapcsolható lyukszűrőt tartalmaz. Ez utóbbi frekvencia az osztrák villamosított vasútvonalak üzemeltetéséből származó ELF zavarokra jellemző. Ezek a mesterséges eredetű jelek a Széchenyi István Geofizikai Observatórium területén szerencsére csak a mágneses térkomponensekben jelennek meg zavaró mértékben, ezért ezt a szűrőt csak ezek adatcsatornáiban kellett elhelyezni. Sajnos a Győr-Sopron-Ebenfurti Zrt. (GYSEV) villamosított vasútvonalának zavarai, bár nem folyamatosan, de a mérendő spektrális tartomány egészét terhelik a mágneses térkomponensek esetében.

A három megfigyelt térkomponens jelét az erősítőrendszer kimenetén a ± 2.5 V feszültségtartományban egy 12 bit felbontású PC kártya (analóg/digiális átalakító - A/D konverter, Data Translation DT2801-A) digitalizálja a csatornák szekvenciális mintavételezésével (azaz egyszerre egy csatornából egy mintavételezést végez a kártya, a következő mintavételezés a következő adatcsatornából történik és így tovább). A mintavételi frekvencia adatcsatornánként 514.3 Hz. Az észlelő szoftver (© Robert Boldi, Massachusetts Institute of Technology, USA) a betáplált értékhez – itt 512 Hz – legközelebbi olyan mintavételezési frekvenciát használja, ami az A/D kártya belső órajelének egész szám szorosa. A mintavételi frekvencia jóval meghaladja a mérőrendszer átviteli sávja által meghatározott minimálisan szükséges Nyquist határt [Smith, 1997] (ami itt kb. 80-90 Hz). Ennek elsődleges oka az, hogy így előfeldolgozás nélkül is látható az idősorok finomszerkezete. Másrészt magasabb mintavételi frekvencia esetén az azonos sorszámú minták rögzítése közötti időkülönbség csökken és így az elektromos és a mágneses adatcsatornában egyszerre megjelenő, koherens jelek könnyebben felismerhetőek. A SRT-ek is ilyenek, így ezek azonosításában a koherencia felismerésének fontos szerepe van.

A digitalizált idősorokat az adatgyűjtőprogram egy egyszerre kb. 20 másodpercnyi regisztrátumot befogadni képes pufferbe gyűjti, majd ~8 másodperces blokkokra osztja az áttekinthetőség érdekében. A blokkok bináris formában fájlokba csoportosítva íródnak ki a számítógép háttértárolójára. A program a puffer első adatának a mintavételi időpontját rögzíti a GPS időjel lekérdezésével, a puffer többi adatához az A/D konverter belső órája szerinti késleltetési időket tárol. Az adatok kiírása és az időjel lekérdezése miatt az egyes pufferek között (azaz az előző puffer utolsó blokkjának utolsó adata és a következő puffer első blokkjának első adata között) kb. 9 ezredmásodpercnyi mintavételi szünet van. Ezért fogalmazhatunk úgy, hogy az adatok rögzítése (a karbantartási munkák és a hitelesítések miatti kiesésektől eltekintve) kvázi-folyamatos.

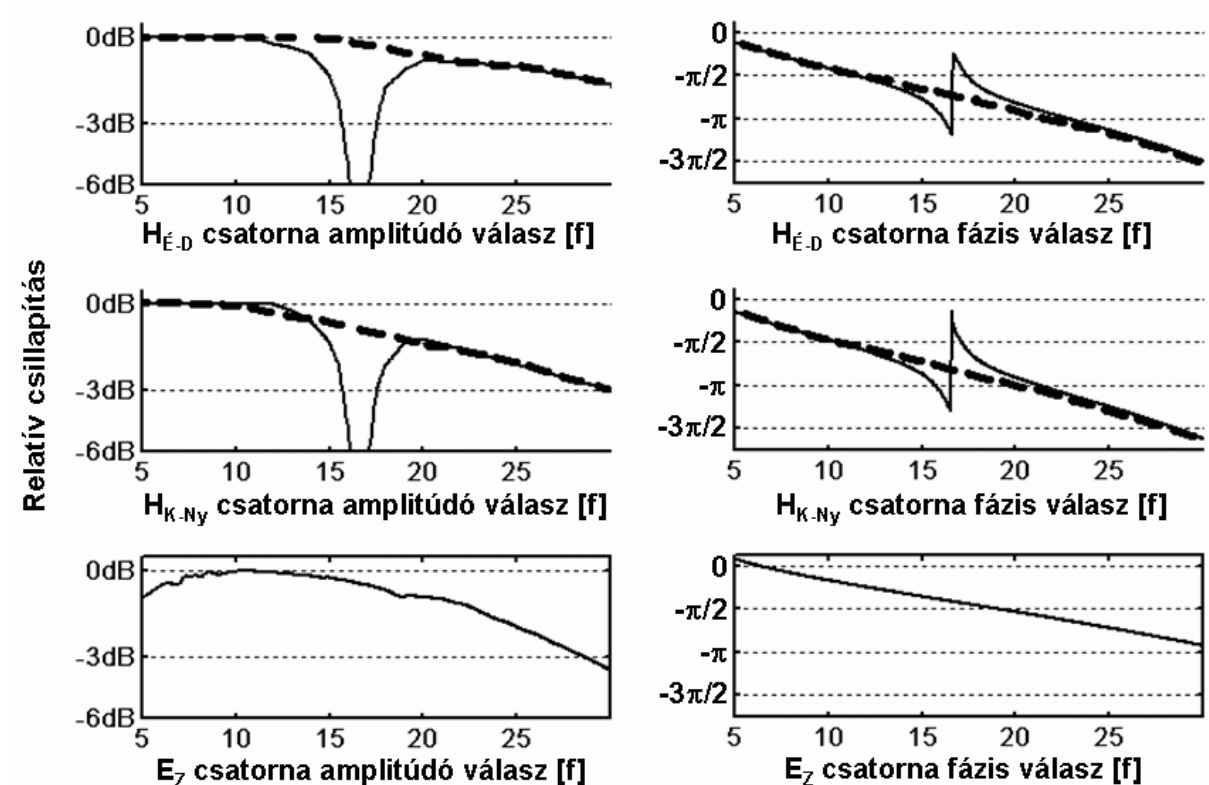
III.2. Hitelesítés

A kapacitív gömbantenna hitelesítése céljából az antenna fölé 3 méteres magasságban egy szigetelő lábakon álló, 1 m^2 felületű, sűrű szövésű fémhálót állítottunk. A hitelesítőhálóra ismert amplitúdójú, szinuszosan változó feszültséget kapcsoltunk. A mérőrendszer észlelési tartományán belül változtattuk a hitelesítő jel frekvenciáját és minden frekvenciánál rögzítettük a mérőrendszer szintén szinuszos választ. A mérőrendszer amplitúdókarakterisztikáját a kimenő jelek ismert amplitúdójának és az erősítő rendszer kimenetén megjelenő „bejövő” jelek amplitúdójának a hányadosaival, a fáziskarakterisztikát pedig a két jel fáziskülönbségeinek a mérésével vettük fel.

Az összeállítás érzékenységének a meghatározásához a hitelesítőháló alatt, a gömbantenna magasságában fennálló elektromos térerősséget kell megadni. A hitelesítőháló felülete a magasságához képest nem nagy, az alatta kialakuló elektromos tér ezért nem homogén. A térerősség változását a háló középpontján átmenő függőleges tengely mentén vizsgáltam véges vezetőképességű féltér felett, 3 m magasságban, párhuzamosan elhelyezett, 1 m^2 felületű, négyzet alakú tökéletes vezetőt tartalmazó modellel. A talaj véges vezetőképességének hatását a hitelesítő háló felszín alatti tükörképének $(\varepsilon_r - 1)/(\varepsilon_r + 1)$ faktossal való skálázásával vettem figyelembe [McDonald, 2009], ahol ε_r a talaj relatív dielektromos állandója. Az antenna füves területen áll, ezért alatta a talaj relatív dielektromos állandóját $\varepsilon_r = 13$ -nak vettem, ami átlagos erdei/réti talajnak felel meg. A térerősséget a gömbantenna közepének magasságában számoltam ki a modellből. A kapott térerősség érték az erősítőrendszer kimenetén a maximális amplitúdóhoz tartozó feszültségértékhez rendelhető minden frekvenciánál.

Az indukciós szondák kalibrációjához a szondákat kiemeltük a beton csatornákból és állványon egyenként egy kellően nagy hitelesítő helyiség mértani közepére helyeztük vízszintesen, a szoba egyik élével párhuzamosan. A szonda tengelyére merőleges két falra 1 m átmérőjű Helmholtz-tekercset erősítettünk úgy, hogy a szonda a tekercsek középvonalában feküdt. A tekercseken ezután ismert amplitúdójú, szinuszosan váltakozó erősségű áramot vezettünk át és rögzítettük a mérőrendszer szintén szinuszos választ. A továbbiakban az amplitúdó és fáziskarakterisztika felvétele a Helmholtz-tekercsekbe bocsátott áram frekvenciájának változtatásával a kapacitív gömbantenna hitelesítésénél leírtakkal analóg módon történt. Az érzékenység megállapításánál feltételeztük, hogy a Helmholtz-

tekercsektől eredő mágneses indukcióvektor párhuzamos a szondákkal és a szondák hossza mentén az amplitúdó nem változik számottevően.



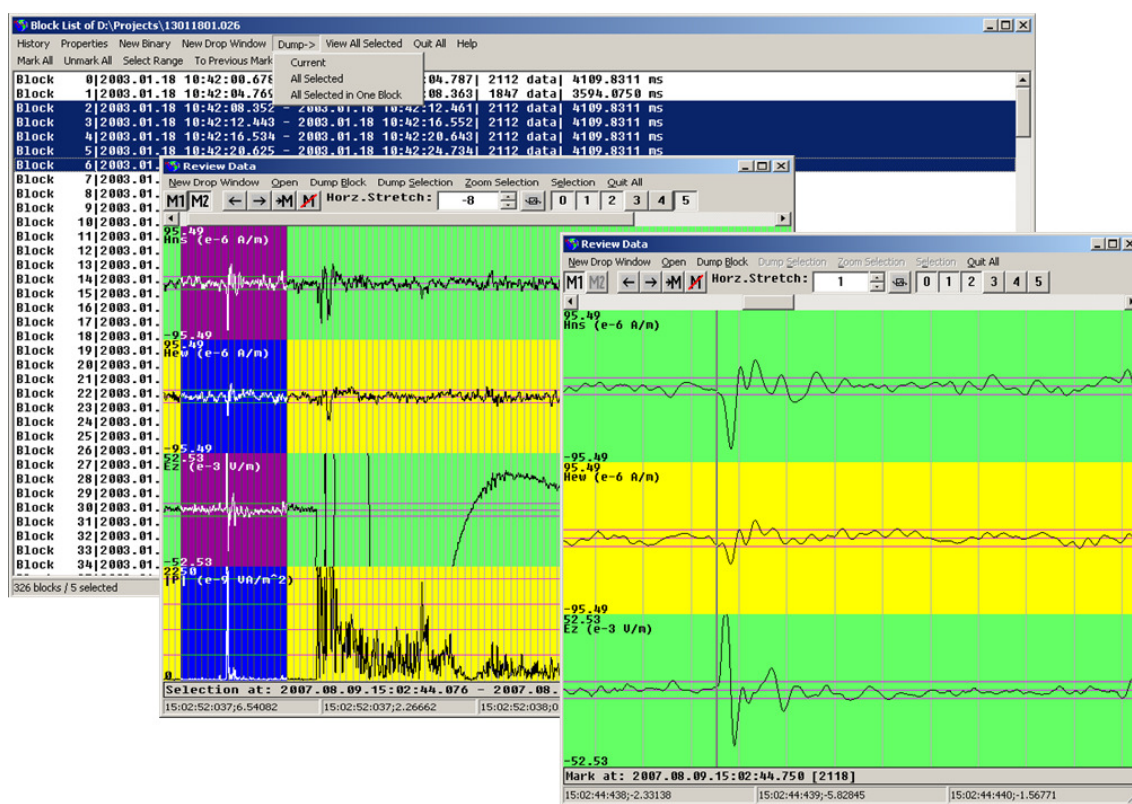
14. ábra: A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő SR mérőrendszer jelátviteli karakterisztikái. Az amplitúdókarakterisztikákat a maximális átvitelre normáltam. (H_{E-D} és H_{K-Ny} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseit, E_Z a vertikális elektromos térkomponenst regisztráló adatcsatornát jelöli.) A mágneses csatornáknál a vastagabb szaggatott vonal a 16 2/3 Hz-es lyukszűrő kikapcsolt állapotához tartozó átviteli görbe.

A mérőrendszer amplitúdó- és fáziskarakterisztikái a 14. ábrán láthatók. A két mágneses szonda átviteli tulajdonságai jól egyeznek, azonban hozzájuk képest a vertikális elektromos adatcsatornában főleg a fázistolás számottevően különbözik. Ez a fázisválaszban megjelenő különbség az elektromos és mágneses adatcsatornáknál az egyidejűleg beérkező jelek különböző mértékű késleltetését okozza, ami miatt a nyers adatsorokban az eredetileg koherens jelek bizonyos mértékig egymáshoz képest eltolva jelennek meg.

III.3. Az adatgyűjtő által rögzített adatok megjelenítése

Az adatgyűjtőszoftver által generált bináris fájlok kezelése és az adatsorok megjelenítése céljából C++ környezetben Windows 32 bites operációs rendszer alatt futó megjelenítőprogramot fejlesztettem (15. ábra, a következő oldalon). A program képes a blokkokban tárolt idősorok megjelenítésére (az egyes csatornák láthatósága egyenként

választható), ezenkívül a térkomponensek idősoraiból a Poynting-vektor horizontális komponenseit előállítja és virtuális adatcsatornáknak lehetővé teszi ezek komponensenkénti megjelenítését, illetve külön a Poynting-vektor amplitúdójának a kirajzolását. A mozgatható kurzor alatti adatpontok észlelésének az időpontjai, és a csatornánkénti, érzékenységekkel skálázott értékek is láthatók. A megjelenített adatsor időbeli felbontása széles határok között változtatható, lehetővé téve a részletek kinagyítását és a keresést. Az adatsorból tetszés szerinti időszelvények jelölhetők ki, és ezek más programok számára könnyen beolvasható szöveges (ASCII) formátumban kimenthetők. A program ezenkívül képes a bináris adatfájlokban az egyes blokkokból a teljes pufferek tartalmának a visszaállítására és teljes pufferek, illetve igény szerint egyes adatblokkok szintén szöveges formátumú kimentésére.



15. ábra

A nyers SR adatokat megjelenítő szoftver.

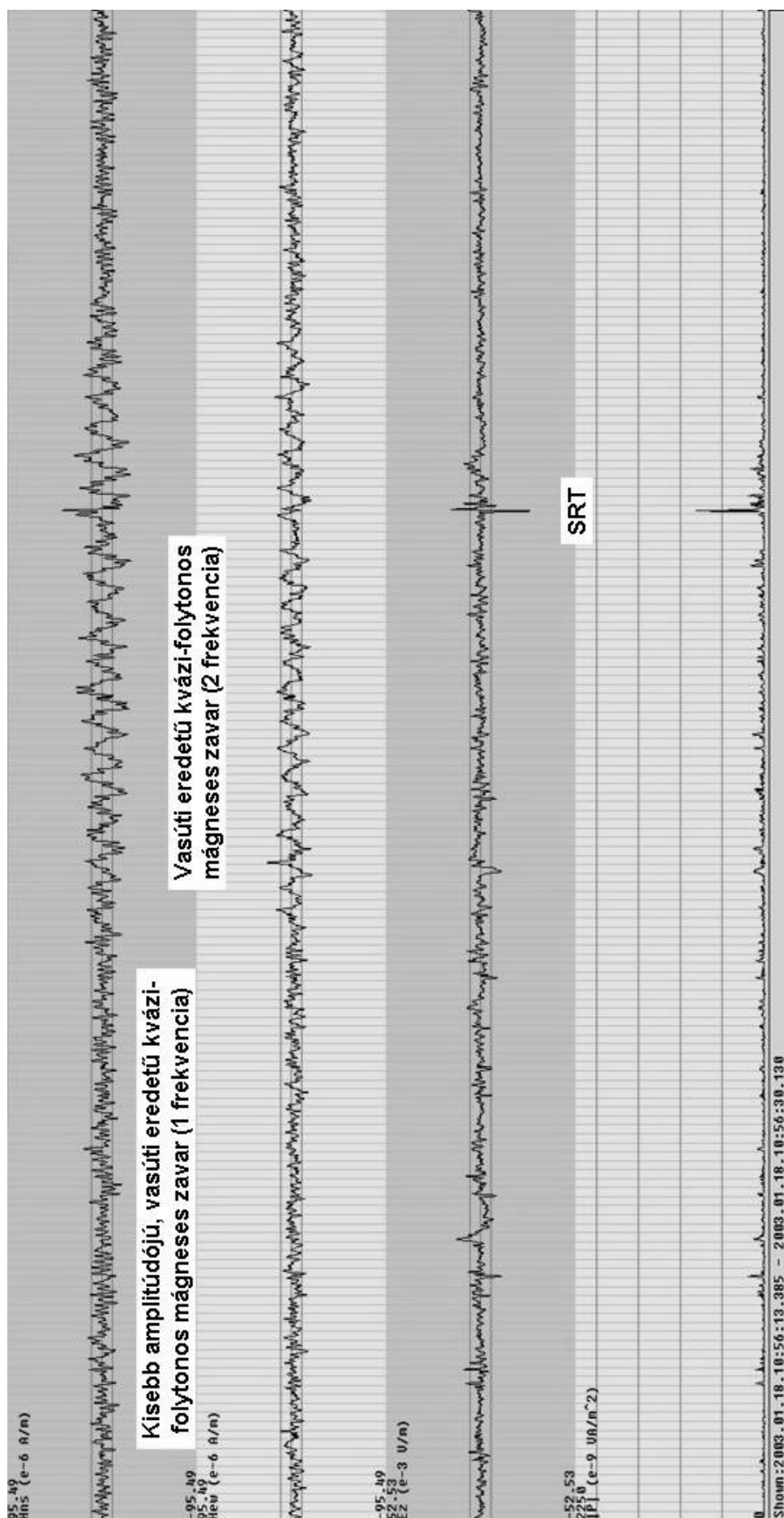
III.4. SRT jelek felismerése a kvázi-folytonos adatsorokban

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium SR adatsoraiban különböző természetes és mesterséges eredetű jeltípusok különböztethetők meg. A háttér ELF rádiózaj kis amplitúdójú kvázi-periodikus fluktuációkból álló, kvázi-stacionárius idősor (31. oldal, 10. ábra). A mért értékek szórása ennél a jeltípusnál a vertikális elektromos térkomponensben 1-3 mV/m, a

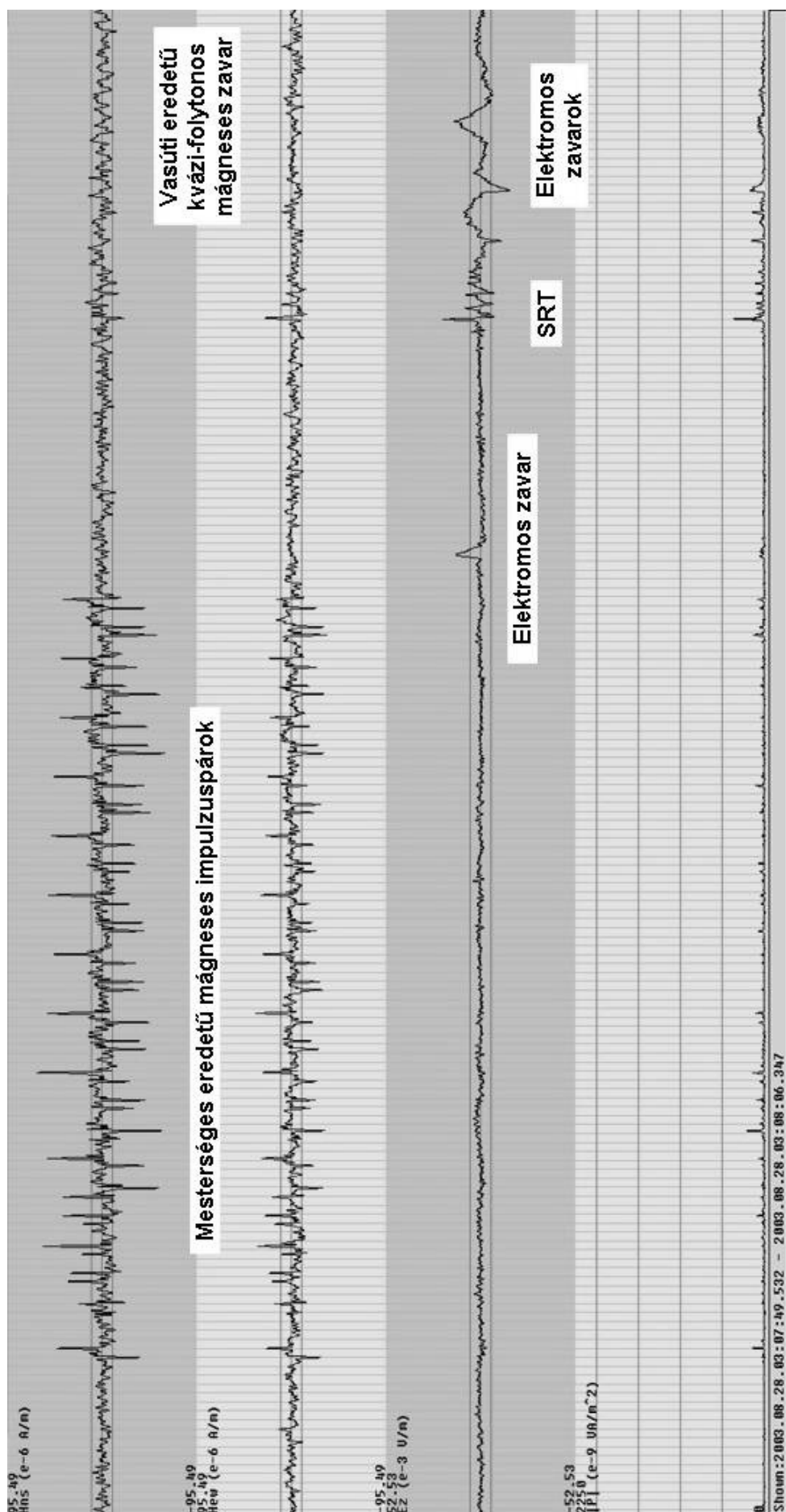
horizontális mágneses tér komponenseiben kb. 5 pT (kb. $4 \cdot 10^{-6}$ A/m). A háttér ELF rádiózaj forrásai a földi zivatar-tevékenység során létrejövő villámkisülések. A jel a bolygószerke bekövetkező, másodpercenként kb. 40-50 kisülés [Christian et al., 2003] közben kisugárzott és a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjedő, egymással inkoherens, ELF sávú hullámoknak a megfigyelőhelyen mért szuperpozíciója. A háttér ELF rádiózaj hosszabb, legalább néhány perces idősorának spektrumában már megfigyelhetők a háttér SR csúcsok (9. ábra a 30. oldalon). E jeltípus tulajdonságait ebben a dolgozatban nem vizsgálom, a kapcsolódó kutatások és eredmények a szakirodalomban megtalálhatók [Nickolaenko és Hayakawa, 2002; Satori et al., 2009]. Bár valamennyi természetes és mesterséges eredetű ELF tranziens, illetve zavar erre a háttér ELF rádiózájra szuperponálódva jelenik meg, kis amplitúdója miatt a háttérzaj hatása a legtöbb esetben elhanyagolható.

Az obszervatóriumban megfigyelt mesterséges eredetű ELF zavarok a közelben futó villamosított vasútvonalak üzemeltetésével vannak kapcsolatban, és szerencsére többnyire csak a mágneses térkomponensek idősoraiban jelennek meg zavaró mértékben. Ez lényegesen megkönnyíti a megkülönböztetésüket a természetes eredetű jelperturbációktól. A vasúti forgalomtól származó jelek egyik csoportjába az általában néhány másodperctől pár percig tartó, periodikus tulajdonságú zavarok tartoznak, amelyek amplitúdója a természetes háttér ELF rádiózaj amplitúdójának 2-4 szerese és amelyek egyszerre egy vagy két domináns frekvenciakomponensből állnak (16. ábra, a következő oldalon). Ez a zavartípus több különböző frekvencián is megjelenhet a mérésekben. A másik, szintén a villamosított vasúthoz köthető zavarcsoportot tranziens jellegű és különálló impulzuspárok, illetve ezek 2-30 párt tartalmazó sorozatai alkotják. Egy impulzuspár tagjainak beérkezése között 100 ms az időkülönbség és az impulzusok horizontális orientációja különböző lehet. Sorozatot alkotó impulzuspárok esetén az egy páron belüli impulzusorientációk konfigurációja legtöbbször azonos. Mivel az impulzuspárok amplitúdói a SRT-ekkel egy nagyságrendbe esnek, lényegesen megnehezíthetik ezek felismerését, illetve feldolgozását (54. oldal, 17. ábra).

A természetes eredetű jelek egy része helyi zavar. Ezek leginkább a vertikális elektromos térkomponensben mutatkoznak meg, mivel a mágneses indukciós szondák védett helyen fekszenek, a gömbantenna viszont ki van téve a szűkebb környezet változásainak. Az elektromos adatokban bekövetkező, különböző helyi tényezők hatásának betudható zavarok időskálája és amplitúdója széles határok között mozog. Ezek vagy az antenna kapacitásának a megváltoztatásán keresztül okoznak különböző perturbációkat (pl. eső, hó, az antennával fizikailag érintkező rovarok, pókok, madarak, az antenna mechanikai mozgásai pl. szél miatt, 78. oldal, 26. ábra), vagy az elektromágneses tér torzításán keresztül fejtik ki hatásukat (pl. az



16. ábra: Kvázi-folytonos, vasúti eredetű zavarok a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer adataira. A függőleges szürke vonalak 100 ms-os intervallumokat jelölnek. H_{ns} és H_{cw} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseinek, E_z a vertikális elektromos térkomponensnek, $|P|$ a Poynting-vektor abszolút értékének az idősorát jelöli.



17. ábra: Valószínűsíthetően természetes eredetű elektromos zavarok és mesterséges eredetű mágneses impulzuspárok a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer adataiban. A függőleges szürke vonalak 100 ms-os intervallumokat jelölnek. H_{ms} és H_{nw} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseinek, E_2 a vertikális elektromos térkomponensnek, $|P|$ a Poynting-vektor abszolútértékének az idősorát jelöli.

antenna közelében mozgó, elektromosan vezető tulajdonságú tárgyak, illetve élőlények; magasabb fűszálak és fák hajladozása szél hatására; rovarok, madarak, állatok, emberek elhaladása; fűnyírás, stb.). Ez utóbbi térszavak természetesen a mágneses adatcsatornában is megjelennek, de mivel az indukciós szondák és a gömbantenna között kb. 100 m távolság van, az ilyen zavarok egybeesése nem túl gyakori (17. ábra, az előző oldalon).

A természetes, de nem lokális eredetű ELF perturbációk forrásai nem átlagos villámkisülések. Ezek legtöbbször olyan vertikális, egy fővillámú kisülések, ahol a fővillámot egy lassabban változó ún. fennmaradó áram (continuing current) követi, amely az ELF tartományban hatékony sugárzó. Az ilyen villámok leggyakrabban felhő-föld kisülések. A vertikális orientáció miatt a kisugárzott energia nagyobb hányada kerül a TM_0 hullámterjedési módusba, amelyben a SR frekvenciasávon belül, 50-60 Hz alatt a kisebb csillapításnak köszönhetően a forrástól nagyobb távolságokra is eljuthat. A megfigyelőhelyhez közelebbi (általában 1000 km-en belüli) villámkisülésektől származó hullámok energiája még olyan nagy, hogy az A/D konverter által kezelni képes feszültségeknél nagyobbakat produkálnak az erősítőrendszer kimenetén, így a mérést „telítik”. Szélsőséges esetben az erősítőket is átmenetileg túlterhelhetik. Ezeket az eseményeket ELF villámoknak nevezzük (ELF flash, 31. oldal, 10. ábra) [Ogawa et al., 1966].

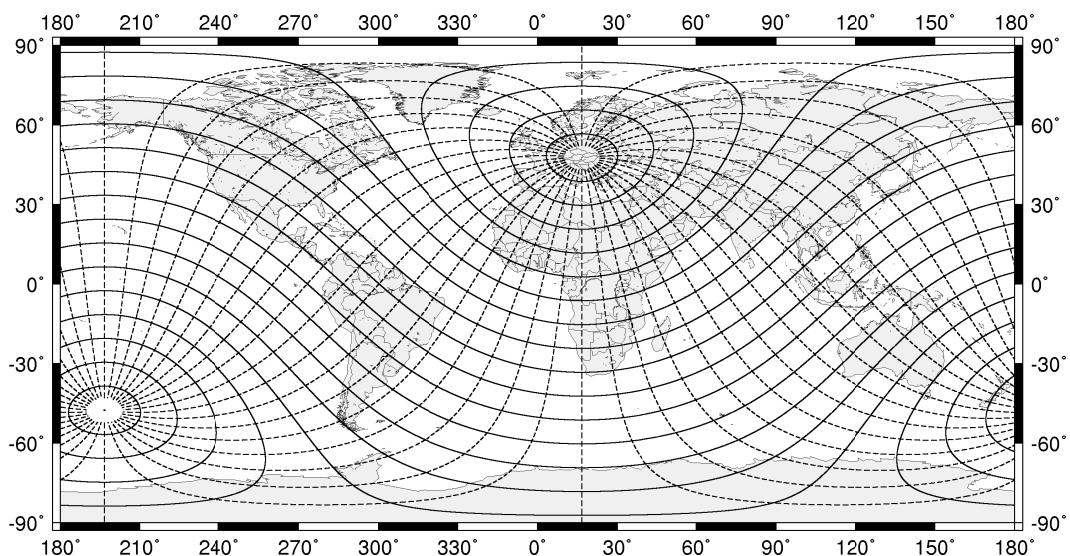
A kb. 1000 km-nél távolabbi (akár az obszervatórium gömbi átellenes pontjában, ún. antipodjában bekövetkező) ELF forrásvillámokból származó hullámcsomagok áthaladását az obszervatórium fölött az ELF háttérből kiemelkedő, átlagosan kb. tízszeres amplitúdójú tranziens jelek mutatják (31. oldal, 10. ábra). A forrásból a forrást és az obszervatóriumot összekötő gömbi főkör mentén a rövidebb úton érkező ún. direkt vagy közvetlen jelek mellett legtöbbször jól láthatók a másik irányban a forrás gömbi átellenes pontja felől érkező ún. antipodális hullámok jelei is. Ezek a direkt jelek után, a nagyobb forrás-észlelő távolság miatt általában elkülönülve érkeznek be. Amplitúdójuk a direkt jelekénél kisebb, jelalakjuk időben szélesebb, ami a hosszabb terjedési út során szenvedett jelentősebb diszperzió következménye. Ezek a szekvenciális hullámvonulatok a SRT-ekre jellemzők és így felismerésükben fontos szerepet játszanak.

A villámoktól származó tranziensek közös tulajdonsága, hogy a vertikális elektromos és a horizontális mágneses térkomponensben egyszerre jelennek meg. Ezek alapján a SRT-ek azonosíthatók az elektromos és (beérkezési iránytól függően) legalább az egyik mágneses adatcsatornában észlelt koherens, jellemző hullámvonulataik alapján. Az elektromos és mágneses komponensek közötti koherencia egyszerű mutatója a Poynting-vektor, amelynek horizontális összetevője az energia terjedésének irányába mutat. Pontforrás esetén, mint

amilyen a villámkisülés is, a hullámok terjedésének jól meghatározott iránya van. Az ELF háttér esetén is beszélhetünk energiaáramlásról, tekintve hogy a globális zivatartevékenységek domináns területei az egyenlítő mentén Közép- és Dél-Amerika, Közép-Afrika és Madagaszkár, illetve Dél-Kelet-Ázsia és Indonézia, amelyek a Föld forgásával egymás után aktivizálódnak a nap folyamán helyi idő szerint kora délután. A háttér ELF rádió zaj gerjesztése azonban inkohérens és így a SR csúcsokhoz hasonlóan a háttér zaj Poynting-vektora is csak hosszabb idősorok feldolgozása után mutat kimutatható irányultságot [Belyaev et al., 1999; Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 4.2.2. fejezet]. A Poynting-vektor horizontális komponenseinek idősora a megfigyelt térkomponensek idősoraiból egyszerűen előállítható (x tengely: kelet (pozitív) – nyugati irány, y tengely: észak (pozitív) – déli irány):

$$P_{ED}(t) = E_Z(t) \cdot H_{\phi,KNy}(t), \text{ és } P_{KNy}(t) = -E_Z(t) \cdot H_{\phi,ED}(t).$$

Itt \hat{E} észak, D dél, K kelet, Ny nyugat, $E_Z(t)$ a vertikális elektromos térkomponens t időponthoz tartozó eleme, H_{ϕ} -vel a mágneses tér horizontális komponensét jelöltem. Bár a három adatcsatorna szekvenciális mintavételezése miatt a regisztrátumokban az elektromos és mágneses csatornák azonos sorszámú adatpontjai nem pontosan ugyanahhoz az időponthoz tartoznak, a magas mintavételi frekvencia miatt az időeltolódás nem nagy, így a nyers adatsorokból előállított Poynting-vektor is alkalmazható SRT-ek keresésére. A Poynting-vektor horizontális amplitúdójának $|P(t)| = \sqrt{(P_{ED}(t))^2 + (P_{KNy}(t))^2}$ tranziensei jó előjelzői a SRT-ek észlelésének, azonban egyértelmű eredmény a különböző zajok véletlen egybeesésének lehetősége miatt csak jelalakok vizsgálata után adható (16. és 17. ábra az 53. és 54. oldalon).



18. ábra: A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumtól azonos irányokban (szaggatott vonalak, 10°-onként) és egyenlő távolságokra (folytonos vonalak, 1 Mm-enként) elhelyezkedő pontok helyei a Földön.

A fenti módszer hatékonysága a megfigyelőhely gömbi átellenes pontjához közelebbi források esetén csökken, mivel a forrás antipodjában a mágneses tér eltűnik (38. oldal, 12. ábra). Ráadásul a direkt és az antipodális hullámok átlapolnak, ezért nem különböztethetők meg. Szerencsére a Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium gömbi átellenes pontja a Csendes-óceán déli része fölött helyezkedik el, ami nem tartozik az aktív zivataros területek közé, és így az antipod környékéről érkező jelek száma nem nagy (18. ábra, az előző oldalon).

III.5. Nyers regisztrátumok előkészítése a további elemzéshez

Az adatsorok nyers formájukban is alkalmasak pl. a különböző jeltípusok elkülönítésére és a SRT-sek felismerésére, azonban a további elemzéshez előkészítést kell alkalmazni, amely során rekonstruáljuk az antennák által mért elektromos és mágneses tereket, amennyire lehetséges.

Az első korrekció az adatpontok rögzítési idejét érinti. Az adatgyűjtő puffer első adatának rögzítési idejét az adatgyűjtő szoftver a GPS óráról kérdezi le, így az mindig pontos érték. Az A/D átalakító kártya adatgyűjtő program által használt és tényleges órafrekvenciája között viszont egy nagyon csekély, a számítógép számbázis pontosságának nagyságrendjébe eső eltérés van. Ebből adódóan a kalkulált csatornánkénti mintavételi frekvencia és a puffer további adatpontjainak ebből számolt időeltolódása nem pontos. A ~20 másodperces puffer utolsó adatánál a kumulatív hiba már kb. +18 ms. Az A/D kártya pontos órajelét ismert frekvenciájú szinuszos jel hosszabb idejű rögzítésével határoztam meg. Az adatpontok rögzítési idejének a korrekciója egy nyers időeltolódásokra alkalmazandó szorzófaktorral történik, amely az adatgyűjtő programból származó nyers, csatornánkénti mintavételi frekvencia függvénye. (A korrekció elvégzéséhez először rekonstruálni kell az adatgyűjtő pufferek teljes tartalmát a szoftver által rögzített blokkokból.) Az időeltolódások korrekciója után a helyes mintavételi frekvencia akár az adatpontok korrigált időeltolódásaiból is meghatározható. Az egyes adatok felvételének időpontja így ezredmásodperces pontosságú az egész pufferben. A SRT-ek észlelési időpontjának a pontos ismerete különösen akkor fontos, ha a forráskisülést a kisülés időpontja alapján kell azonosítani pl. lokális VLF villámfigyelő hálózat listájában, ahol egy aktív zivatar közben nagyon gyakran követhetik egymást a regisztrált villámkisülések.

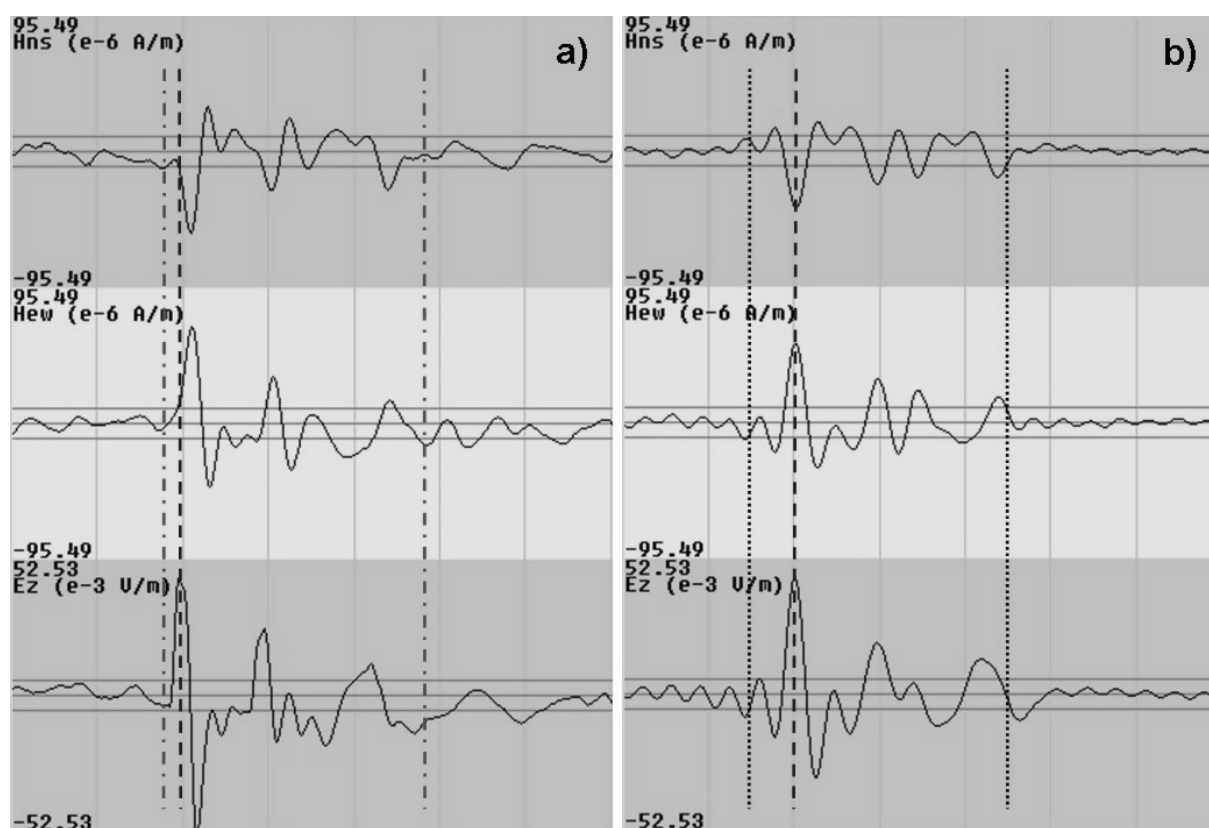
Másodikként a különböző adatcsatornáknál az azonos sorszámú pontok közötti időeltolódást korrigáltam, amely az adatgyűjtő szoftver szekvenciális mintavételezése miatt

figyelhető meg. A korrekcióhoz az adatpontok közötti interpoláció szükséges, amire több eljárás létezik. Ezek közül a Fourier-interpolációt választottam, amely azonos időközönként felvett adatpontoknál alkalmazható és nem torzítja a jelsor spektrumát. Az interpolációt a teljes puffertartalom első két adatcsatornáján (a horizontális mágneses tér komponenseinek az adatcsatornáin) hajtottam végre és a harmadik adatsor (a vertikális elektromos térkomponens idősora) adatait és időpontjait tartottam meg. Az interpoláláshoz a Matlab 4.2c programcsomag *interpft* rutinját használtam. A korrekció nem okoz jelentős változást az idősorokban, mivel a mérőrendszer átviteli sávja alacsony frekvenciatartományba esik és a mintavételi frekvencia elég magas. Mégis különösen a tranziensek beérkezésénél a hirtelen amplitúdóváltozásoknál szerepe van, mert a különböző adatcsatornák jeleinek a koherenciáját ezeknél a viszonylag gyorsan változó szakaszoknál kis időkülönbségek is számottevően befolyásolhatják.

A harmadik művelet a mérőrendszer amplitúdó- és fázistorzításának (50. oldal, 14. ábra) korrigálása. Amíg az előkészítés első két lépését a SRT-t tartalmazó puffer teljes adatsorán hajtottam végre, az utolsó beavatkozást a további feldolgozást szem előtt tartva a tranzienszt tartalmazó rövidebb idősoron végeztem el. A SRT-ek jellemző hullámformáik és a Poynting-vektor kiugró amplitúdója alapján a nyers adatsorokban is felismerhetők. A SRT észlelési időpontját annak a vertikális elektromos adatpontnak a felvételi idejével azonosítottam, amelyben a tranziens első csúcsa felé haladva a következő ponttal a véges differenciák módszerével számított gradiens először volt nagyobb, mint az előző 10 pontban hasonlóan számolt, azonos előjelű gradiensek átlagának a háromszorosa. A tranziens időablakát az észlelési időhöz tartozó adatpont előtt kb. 10 ms-mal (5 adatpont) indítottam és ~300 ms hosszúra (155 adatpont) vettem. Tekintetbe véve, hogy a SR sávban a hullámok átlagos csoportsebessége a fénysebesség 0.8 szorosa [Chapman et al., 1966], a Föld megkerüléséhez ennél a sebességnél 166 ms-ra van szükség. A 300 ms-os időablakba így a forrás direkt hullámainak az egy teljes főkört befutott visszatérése is belefért (19.a ábra, a következő oldalon). A tapasztalat azt mutatta, hogy ez az ablakhossz az analízis elvégzéséhez elegendő, hosszabb ablak alkalmazása nem befolyásolta a kapott eredményeket. Hosszabb ablak használata másik forrásból érkező tranziensek, illetve különböző zavarok megjelenése miatt nem is volt mindig lehetséges, sőt előfordult, hogy nem állt rendelkezésre még 300 ms-nyi olyan idősor sem, amely egyetlen forrásból származó tranzienszt tartalmazott. A jelelőkészítést ez természetesen nem befolyásolta, viszont teljes analízis ebben az esetben nem mindig volt elvégezhető, mivel az elemzés során az események spektrumát használtam,

aminek a felbontása rövidebb adatsornál kisebb, így a levezetett eredmények bizonytalansága nagyobb.

A tranzienszt tartalmazó elektromos és mágneses idősorokat nullákkal 2^{11} hosszúságra egészítettem ki (zero padding) [Smith, 1997], mielőtt a Fourier-transzformáltját előállítottam volna. A transzformációból kapott együtthatókból a mért adatsor amplitúdó- és fázisspektrumát előállítottam. Az adatsor virtuális meghosszabbításának eredményeképpen nagyobb felbontású spektrumot kaptam. Mivel a kiegészítés nullákkal történt, a nagyobb felbontást további zaj hozzáadása és a tranziens spektrumának a torzulása nélkül lehetett elérni.



19. ábra: a) SRT nyers adata 2003. március 31. 18:58:38.000 UTC után. A függőleges világosszürke vonalak 100 ms-os intervallumokat jelölnek. H_{ns} és H_{ew} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseinek, E_z a vertikális elektromos térkomponensnek az idősorát jelöli. Pont-szaggatott vonalak határolják a további feldolgozáshoz kiválasztott 300 ms-os időszelést. **b)** A SRT további feldolgozáshoz előkészített adata. Itt pontozott vonalak határolják a spektrumszámításhoz kiválasztott adatszakaszokat. **Mindkét ábrán** szaggatott vonal jelzi a SRT első csúcsának helyét az E_z térkomponens adataiban.

Úgy az elektromos, mint a mágneses adatcsatornák esetén a mérőrendszer karakterisztikái az 5-30 Hz-es frekvenciasávban voltak ismertek, ezért csak ebben a tartományban rekonstruálhattam a természetes jeleket. A mérőrendszer általi torzítás matematikailag egyenértékű az eredeti jel amplitúdóspektrumának a mérőrendszer amplitúdókarakterisztikájával való összeszorzásával, valamint a mérőrendszer

fáziskarakterisztikájának az eredeti jel fázisspektrumához való hozzáadásával (késleltetés). A rekonstrukció során ezeknek a műveleteknek a fordítottját kellett elvégezni, azaz a mért fázisspektrumból ki kellett vonni a mérőrendszer fáziskarakterisztikáját, a mért amplitúdóspektrumot pedig el kellett osztani a rendszer amplitúdókarakterisztikájával. Ezeket a műveleteket minden mérési csatornában külön-külön, a csatorna saját átviteli karakterisztikáival elvégeztem. Az 5-30 Hz-es tartományon kívül eső frekvenciák esetében az osztást nem lehetett elvégezni, ezért ott az amplitúdókat nullákkal tettem egyenlővé. Ha a mágneses adatsatornában a 16 2/3 Hz-es lyukszűrő be volt kapcsolva, ugyanígy kezeltem a 15.6-17.5 Hz-es frekvenciatartományt, ahol a szűrő csillapítása meghaladta a -6 dB-t (50. oldal, 14. ábra) és ezért a rekonstruált jel túl sok felerősített zajt tartalmazott volna. A korrigált amplitúdó- és fázisspektrumot Fourier-transzformációs együtthatókká alakítottam, majd inverz transzformációval előállítottam a korrigált jelek idősorait, amelyek a jelanalízis kiindulópontjául szolgálnak.

A korrigált elektromos és mágneses idősorokban a tranziens csúcsai egyidőben jelennek meg (19.b ábra, az előző oldalon). A nyers elektromos és mágneses adatsorok inkoherenciája nagyobb részben az adatsatornák különböző fáziskarakterisztikáinak tudható be és csak kisebb részben származik a csatornák szekvenciális mintavételezéséből az adatgyűjtés során. Másrészt az adatsorokban nincsenek hirtelen elugrások és láthatóan hullámosabbak. Mindkét jellemző a 30 Hz-nél magasabb frekvenciájú komponensek levágásának a következménye. A spektrum egy véges, esetünkben nem túl széles tartományának kiválasztása egyenértékű egy éles határu sáváteresztő szűrő használatával, amelynek az eredménye a hullámosság megjelenése. Mivel az elektromos és a mágneses adatsatornában ugyanazon sáv szélességű (5-30 Hz) digitális sávszűrőt alkalmaztuk, a megjelenő hullámok a jelek koherenciáját nem torzítják. A mérőrendszer amplitúdó- és fázistorzításának korrigálását Matlab 4.2c környezetben futó, saját készítésű programkóddal végeztem.

A korrigált adatsorok további elemzésében lényegében Wong, illetve Huang módszerét követtem a forráskisülés polaritásának, földrajzi helyének, vertikális árammomentum spektrumának és töltésmomentumának a levezetéséhez [Wong, 1996; Huang et al., 1999]. Az adatok feldolgozása közben szerzett tapasztalatokat felhasználva az eredeti módszer néhány lépésén módosítottam. Ezekre a módosításokra az eljárás ismertetése során az érintett lépéseknél részletesen kitérek.

III.6. A forrás polaritásának meghatározása

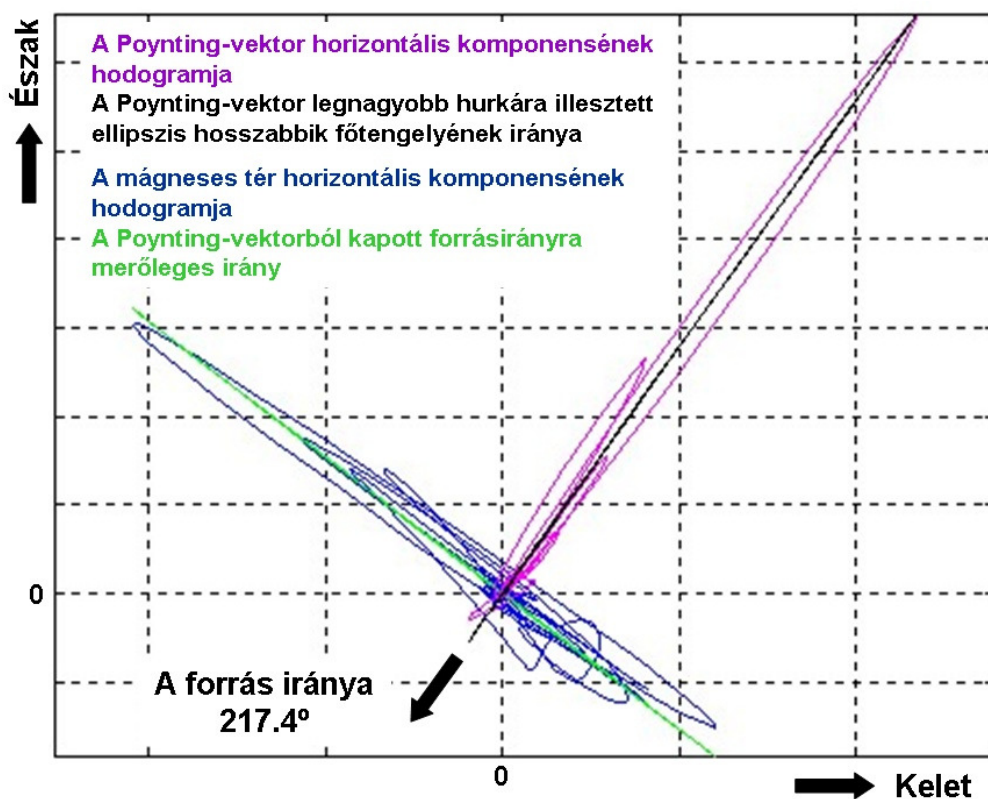
A forrás polarítására utal a vertikális elektromos térkomponensben, a tranziens beérkezésekor a jel kitérésének az iránya [Wong, 1996; Huang et al., 1999]. A polaritás meghatározását célszerű a nyers adatsor alapján elvégezni, mivel a mérőrendszer átviteli tulajdonságai által okozott változások korrigálása után a jel oszcillációi közül nem mindig egyértelmű, hogy melyiket tekinthetjük az első maximumnak. A példákban szereplő SRT-eket úgy ábrázoltam, hogy pozitív polaritású forrásnak a vertikális elektromos idősorban a pozitív irányú kitérés felel meg. Ennek megfelelően a 19.a ábrán (59. oldal) és az 10. ábrán (31. oldal) látható SRT-ek pozitív polaritású forrástól származnak, míg az 10. ábrán látható ELF villám polarítása negatív volt.

III.7. A forrás irányának meghatározása

A megfigyelőhelyet a forrással összekötő gömbi főkört meghatározza a mágneses tér polarizációs síkja, amely merőleges a terjedés irányára. Ez azonban a forrás irányára nézve még 180° bizonytalanságot tartalmaz. A Poynting-vektor horizontális komponense azonban egyértelmű információval szolgál, ugyanis az először beérkező (direkt) hullámcsomag a forrástól távolodik, így a forrás iránya a Poynting-vektor horizontális vetülete által kijelölt iránnyal éppen ellentétes [Jones és Burke, 1990]. A horizontális mágneses tér és a Poynting-vektor észak-déli komponenseit a megfelelő kelet-nyugati komponensek függvényében ábrázolva a forrás iránya szembetűnően kirajzolódik, mint a Poynting-vektor legnagyobb amplitúdójú elemeivel ellentétes irány (20. ábra, a következő oldalon).

Az ezzel a módszerrel meghatározott irány abszolút pontosságát Füllekrug és Sukhorukov vizsgálta helyi villámfigyelő hálózatok és két távoli SR állomás adatainak felhasználásával [Füllekrug és Sukhorukov, 1999]. Több ezer SRT feldolgozása után tapasztalataik szerint az átlagos forrásirány-eltérések nem függenek a forrás-észlelő távolságtól, viszont egy állomásspecifikus kvázi-állandó, valamint egy napi változást mutató nem állandó tagból tevődnek össze. A kvázi-állandó tag jelenléte az obszervatórium geoelektromágneses környezetének olyan kiegyenlítetlenségeiből eredhet, mint pl. a talajközeli rétegek eltérő irányokban különböző vezetőképessége, vagy partközeli obszervatórium esetén tenger közelsége. A napi változás gyakorlatilag a helyi időben éjszakai észleléseknél tapasztalt átlagosan nagyobb hibát jelenti a nappali észlelések irányhibájához képest. Ennek

okát a szerzők abban látják, hogy éjszaka magasabban helyezkedik el az ionoszféra ELF hullámokkal kölcsönhatásban álló alsó határrétege. E réteg vezetőképessége kb. 65-70 km fölött már anizotrop, mivel a geomágneses tér hatása a kisebb sűrűség, azaz a részecskék alacsonyabb ütközési gyakorisága miatt e magasság fölött már érvényesülni tud. A hullámvezető bármelyik határfelületének vezetőképességi anizotrópiája a horizontális mágneses térkomponens polarizációs síkjának elfordulását okozza. Bár egy obszervatóriumban az iránymeghatározás állandó hibája felmérhető és ezzel, valamint az észlelés időpontja szerinti átlagos változó hibataggal lehetséges korrigálni a mindenkor észleléseket, a maradék irányhiba szórása így is megközelíti a korrekció nagyságrendjét. Füllekrug és Sukhorukov a maradék hibát az ionoszférikus alsó határréteg különböző időskálájú és amplitúdójú irregularitásainak tulajdonították.



20. ábra

A forrás irányának meghatározása az előkészített adatsorokból.

Az irány meghatározására egy lehetséges megoldás egyenes illesztése a Poynting-vektor legnagyobb amplitúdójú elemei által a síkon kijelölt néhány pontra. A horizontális mágneses tér azonban az ionoszféra anizotrop felületi impedanciája miatt általában nem lineárisan, hanem különböző mértékben elliptikusan polarizált [Sentman, 1989]. Ez a tulajdonság áttevődik a Poynting-vektorra is, és ha az ellipticitás kicsi (a hurok körhöz közelít), a néhány pontra elvégzett legkisebb négyzetes eltérések szerinti egyenesillesztés

bizonytalan vagy éppen hibás eredményeket adhat. Egyenes illesztése helyett ezért ellipszist illesztettem a legnagyobb kitéréshez tartozó pontra és a közelében elhelyezkedő ± 5 adatpontra [Fitzgibbon et al., 1999] és az ellipszis azon nagytengelyének az iránya jelölte ki a forrás irányát, amely az origóhoz közelebb haladt el (gyakorlatilag a hosszabbik).

Mivel idősorokkal dolgozunk, a forrás irányát mindig meg tudjuk állapítani, ha az első beérkezés csúcsa elég nagy és nem lapolódik át semmilyen zavarral, illetve más forrásból érkező tranzienssel. Egy másik irányból érkező tranziens jelenléte az idősorban azonnal látható a különböző irányultságú hurkokból; direkt átlapolódás esetén pedig a főhurok ellipszistől eltérő aszimmetriájából. A további feldolgozásra alkalmatlan jelek így kiszűrhetők.

A forrás irányának a meghatározását Matlab 4.2c környezetben futó, saját készítésű programkóddal végeztem.

III.8. A forrás távolságának meghatározása

Large és Wait 1968-ban az ELF hullámok terjedési módusainak a nappali-éjszakai ionoszféra aszimmetria és a mágneses tér hatására bekövetkező csatolásait elemezte a horizontális mágneses térkomponensben [Large és Wait, 1968], miközben felfigyelt rá, hogy a tér spektruma a forrás-megfigyelő távolsággal változik. Jones és Kemp később kimutatta, hogy a forrás-megfigyelő távolság a horizontális mágneses térkomponens mellett a vertikális elektromos térkomponens spektrumának a struktúráját is egyértelműen meghatározza, lehetővé téve így a forrás távolságának becslését [Jones és Kemp, 1970; Jones, 1970a]. A forrás tulajdonságai azonban számottevő hatással vannak a megfigyelt hullámformára [Schumann, 1956] és így a spektrumok szerkezetére is. Jones idealizált fővillámtól származtatott spektrumokat konvertált jelalakokká, majd elemezte az észlelőhöz a direkt, valamint a forrás gömbi átellenes pontja felől beérkező másodlagos jelek szuperpozícióját és jó egyezést talált lomha végtatmoszferikék megfigyelt alakjaival [Jones, 1970b]. Kemp és Jones 1971-ben felismerték, hogy a vertikális elektromos és a horizontális mágneses térkomponensek hányadosának, a hullámimpedanciának (Z) az amplitúdóspektruma úgy jellemző a forrás-megfigyelő távolságra, hogy közben a forrás tulajdonságaitól független, és ezért megbízhatóbb eszköze a forrás-észlelő távolság és a csillapítási tényező meghatározásának [Kemp és Jones, 1971].

$$E_r(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{i}{4\varepsilon_0 h a^2} \frac{\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]}{\omega} \frac{1}{\sin(\pi \nu(\omega))} P_{\nu(\omega)}(-\cos \theta)$$

$$H_\varphi(\omega, \theta) = M_I(\omega) \frac{-1}{4 h a} \frac{1}{\sin(\pi \nu(\omega))} P_{\nu(\omega)}^1(-\cos \theta)$$

$$Z(\omega, \theta) = \frac{E_r(\omega, \theta)}{H_\varphi(\omega, \theta)} = \frac{-i}{\varepsilon_0 a} \frac{\nu(\omega)[\nu(\omega)+1]}{\omega} \frac{P_{\nu(\omega)}(-\cos \theta)}{P_{\nu(\omega)}^1(-\cos \theta)}$$

A kifejezésekben E_r a vertikális (radiális), H_φ a horizontális mágneses térkomponenst, θ pedig a forrás és az észlelő szögtávolságát jelöli a mindkettőjüket tartalmazó gömbi főkörön. $M_I(\omega)$ a forrás frekvenciafüggő árammomentum-spektruma, $i = \sqrt{-1}$ az imaginárius egység, ε_0 a vákuum dielektromos állandója, a a Föld sugara, h az ionoszféra alsó határrétegének a magassága a földfelszíntől mérve. A terjedési módusokhoz tartozó komplex, frekvenciafüggő sajátérték $\nu(\omega)$, $P_{\nu(\omega)}$ és $P_{\nu(\omega)}^1$ komplex rendű Legendre és asszociált Legendre polinomok.

Kemp még 1971-ben 50 SRT forrásának földrajzi helyzetét határozta meg a fenti technikával, a távolságbecslést kiegészítve a horizontális mágneses tér polarizációs síkjából származtatott iránymeghatározással [Kemp, 1971]. A források helyei jól illeszkedtek a globális zivatartevékenység ismert gócpontjaihoz. Ishaq és Jones később 1977-ben rámutatott, hogy a hullámimpedancia fázisspektruma is kiválóan alkalmas a forrás-észlelő távolság és a csillapítási állandó meghatározására [Ishaq és Jones, 1977].

Nyikolajenko és Kudincseva 1994-ben a SRT-ek hullámimpedanciájának spektrumát a valós-komplex síkon ábrázolta és ebből kiindulva vezette le a csillapítási tényezőt és a forrás-észlelő távolságot [Nickolaenko és Kudintseva, 1994]. Az eljárás egy viszonylag szélesebb frekvenciatartományban használható alternatívája Jones és Kemp 1971-es módszerének.

A mérőrendszerünk limitált sáv szélességét figyelembe véve Kemp és Jones módszerét követtem és a vertikális elektromos és horizontális mágneses térkomponensek mért spektrumainak hányadosaként előállított hullámimpedancia amplitúdóspektrumát használtam a forrás-észlelő távolság meghatározására. A hullámimpedancia amplitúdóspektrumának a periodicitása változik egyértelműen a forrás-megfigyelő távolsággal. A távolság meghatározásának elve, hogy a mérésekből származtatott hullámimpedancia-spektrumot különböző távolságokhoz tartozó, modellből számolt hullámimpedancia-amplitúdóspektrumok sorozatával hasonlítják össze. A forrás-észlelő távolságnál a modell és a mért spektrumok periodicitásának hasonlósága várhatóan a legnagyobb.

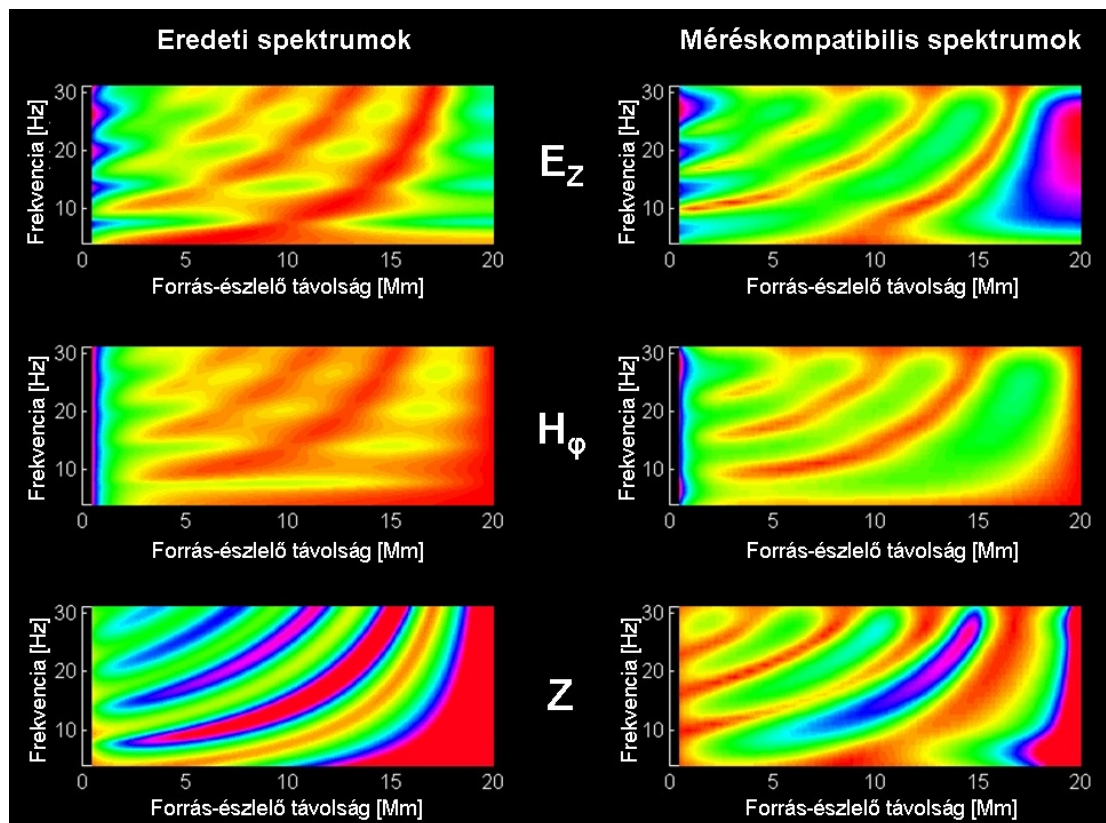
Az összehasonlításhoz szükség volt a mért és az elméleti hullámimpedancia-spektrumokra, ezekhez pedig a horizontális mágneses és a vertikális elektromos

térkomponensek spektrumai kellettek. A horizontális mágneses tér mérésből származó spektrumát az előkészített észak-déli és kelet-nyugati komponensekből alkotott idősor Fourier-transzformálásával állítottam elő. A horizontális mágneses tér idősorát a különböző időpillanatokhoz tartozó észak-déli és kelet-nyugati térkomponensek által meghatározott horizontális mágneses térvektorok forrásirányra eső vetületei alkotják. A Fourier-transzformációt ismételtelen egy 300 ms hosszú időablakba eső adatsoron végeztem el, ugyanannyi zérus értékkel való kiegészítés után, mint a nyers adatok esetében. Az ablakot tapasztalat alapján úgy választottam ki, hogy az idősor legnagyobb abszolút kitérésű értékétől (ami a tranziens első beérkezésének a csúcsa) visszafelé 50 ms-nyi, előre pedig 250 ms-nyi adatot jelöltem ki, így a tranziens biztosan az ablak belsejébe került (59. oldal, 19.b ábra).

Mivel az előkészített adatsorok hullámosabbak, a szélek hirtelen levágásából adódó spektrális torzítás itt jelentősebb, mint a nyers adatok esetében, ahol az időablak széleinél általában csak az ELF háttérzaj észlelhető. A torzítás csökkentése céljából az időablakban levő adatsort Hann ablakfüggvénnyel szoroztam meg, amely a spektrumban a szélek hirtelen levágása miatti torzítást csökkenti, a spektrumot pedig simítja [Smith, 1997; Oppenheim et al., 1999]. A vertikális elektromos térkomponens spektrumát ugyanígy állítottam elő az előkészített idősorból. A vertikális elektromos és a horizontális mágneses térkomponensek komplex Fourier-együtthatóinak a hányadosából fejeztem ki a mért hullámimpedancia-amplitúdóspektrumot. A hányadosképzés helyett nullákkal helyettesítettem a 15.6-17.5 Hz-es tartományt abban az esetben, amikor a mágneses adatsatornák lyukszűrői bekapcsolt állapotban voltak.

A különböző forrás-észlelő távolságokhoz tartozó modell hullámimpedancia-függvények előállításához az II.5., „*Vertikális elektromos dipólusforrás (távoli) sugárzási tere a Föld-ionoszféra hullámvezetőben*” c. fejezetben tárgyalt Jones / Ishaq és Jones modellt használtam a szokásos paraméterezéssel (a föld sugara 6371 km, az ionoszféra alsó határa a földfelszín fölött 80 km, a forrás pedig egységnyi, konstans spektrumú Dirac-delta impulzusforrás). A modell hullámimpedancia-függvények előkészítésénél nagy súlyt fektettem arra, hogy ezek a mért adatsorokból származtatott hullámimpedancia-függvénnyel kompatibilisek legyenek. Ezt szem előtt tartva azokon a frekvenciákon számoltam ki mind az elektromos, mind a mágneses térkomponensek modell spektrális együtthatóit, amelyek egy 300 ms-nyi, nullákkal az alkalmazott hosszúságúra kiegészített nyers adatsor Fourier-transzformációja során adódnak. A mágneses térkomponens esetében szükség szerint itt is kihagytam a mért adatsor lyukszűrők miatt „vak” frekvenciaintervallumát 15.6-17.5 Hz között. A spektrális együtthatók inverz Fourier-transzformációjával előállítottam a térkomponensek

elméleti idősorait. Ezekből az előkészített mért adatsoroknál alkalmazottak szerint kiválasztottam a 300 ms-nyi időablakokat, elvégeztem a Hann ablakfüggvénnyel való szorzásokat és a nullákkal való kiegészítés után meghatároztam a két domináns térkomponens elméleti spektrumait. Ezek hányadosából vezettem le különböző forrás-észlelő távolságokhoz (0.5 Mm és 20 Mm között, 0.1 Mm felbontással) az ilyen értelemben „méréskompatibilis” modell hullámimpedancia-amplitúdóspektrumokat (21. ábra).



21. ábra: Áramimpulzus-forrás modellspektrumai különböző forrás-észlelő távolságoknál (**balra**), és ezeknek a mért adatok kezelésének megfelelő transzformáltjai (**jobbra**). E_z jelöli a vertikális elektromos térkomponens spektrumait, H_ϕ a horizontális mágneses tér spektrumait és Z a komplex impedanciaspektrumokat. A színskála a spektrális amplitúdók nagyságát jelzi és minden panelen úgy választottam meg, hogy a spektrumok struktúrája minden távolságánál jól látható legyen. A modellek strukturáltsága gyakorlatilag megszűnik kb. 500 km-nél közelebbi, illetve kb. 18000 km-nél távolabbi forrástávolságok esetén.

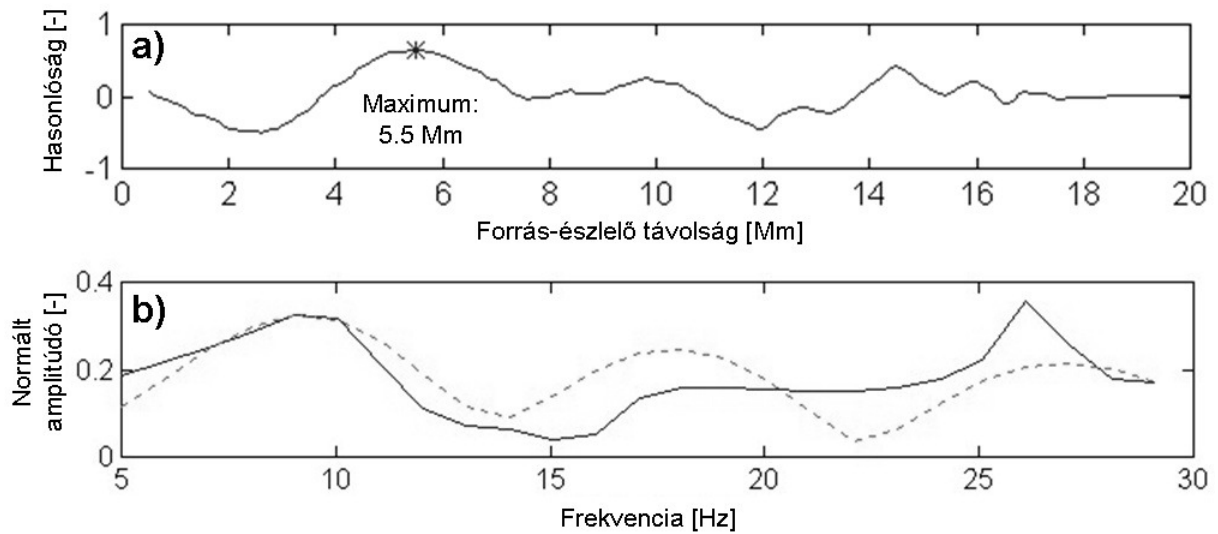
A modell és a mért spektrum periodicitásának az összevetése többféleképpen is elvégezhető, például a spektrum csúcsai közötti átlagos távolság vizsgálatával vagy az amplitúdóspektrum Fourier-transzformáltjában a domináns periódushoz tartozó csúcs helyének meghatározásával. Ugyanezek a módszerek a hullámimpedancia fázisspektrumán is alkalmazhatók. Boccippio és munkatársai 40 esemény forrás-észlelő távolságát határozták meg az említett négy módszerrel [Boccippio et al., 1998]. A levezetett távolságokat iránymeghatározással kiegészítve a források földrajzi helyzetét becsülték és eredményeiket az amerikai VLF villámfigyelő hálózat (National Lightning Detection Network - NLDN) adataival valamint az OTD (Optical

Transient Detector) műholdas villámmegfigyelésekkel vetették össze. Tapasztalataik szerint a hullámimpedancia-amplitúdóspektrum vizsgálatával pontosabb eredmények kaphatók, mint a fázisspektrum felhasználásával. A csúcsok közötti átlagos távolságból és az amplitúdóspektrum Fourier-transzformáltjából számolt forrás-észlelő távolságok közül a Fourier-módszerrel kapottak némileg pontosabbak voltak ugyan, de a két módszer átlagos hibája nem különbözött szignifikánsan.

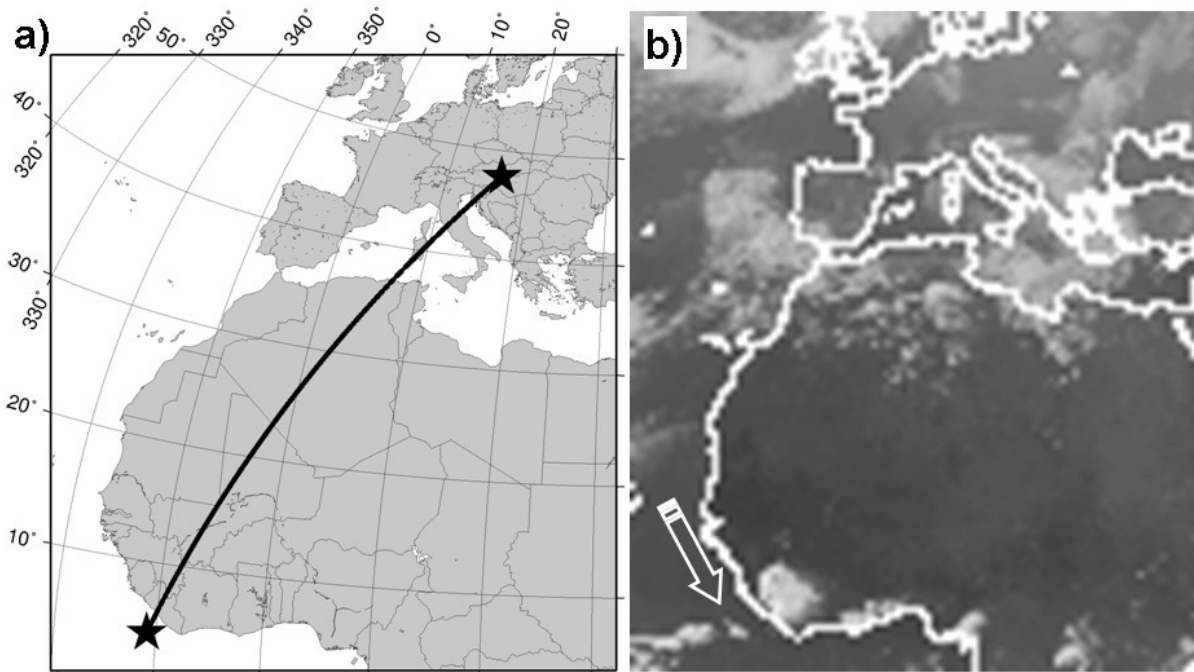
A Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium műszereinek 5-30 Hz-es átviteli tartományába a legtöbb forrás-észlelő távolságnál a hullámimpedancia-amplitúdóspektrumnak mindössze 2-3 csúcsa esik, ezért a Fourier-módszer nem ad megbízható eredményeket. Ezenkívül a mért hullámimpedancia-amplitúdóspektrum csúcsai nem feltétlenül esnek pontosan az aktuális forrás-megfigyelő távolsághoz tartozó helyekre. Ezek az eltérések a néhány meghatározható csúcstávolságnál nem átlagolódnak ki (még akkor sem, ha a minimumhelyeket is bevonjuk a vizsgálatba), így ez a módszer sem kellően megbízható. A modellből származó és a mért hullámimpedancia-amplitúdócsúcsoknak a helye mellett az amplitúdóaránya is jelentősen eltérhet még helyes forrás-megfigyelő távolságnál is, ami a kovariancia- és korrelációanalízis használhatóságának a korlátja.

A modellből származó és a mért hullámimpedancia-amplitúdóspektrumok összehasonlításánál új módszert alkalmaztam, ami a különböző frekvenciáknál a spektrumok gradienseit veti össze. A mérőrendszer átviteli tartományában az amplitúdóspektrumok minden pontjához tartozó frekvenciánál (szükség szerint a 15.6-17.5 Hz-es sáv kivételével) a véges differenciák módszerével meghatároztam a spektrum gradiensét, majd a mért spektrum gradienseit összehasonlítottam egy modellspektrum megfelelő gradienseivel. Azon frekvenciákhoz, ahol a két gradiens előjele megegyezett (+1)-et, amelyeknél különbözött, azokhoz (-1)-et rendeltem. Ezeknek a számoknak az összege jellemzi a két spektrum periodicitásának hasonlóságát. Teljesen azonos periodicitású spektrumok esetén az összeg maximális. A gyakorlatban ez az eset sohasem fordult elő. Ahhoz a modell hullámimpedancia-spektrumhoz tartozó távolságot fogadtam el a forrás-megfigyelő távolság becsléseként, amelynél a mért spektrummal összevetve a gradiensek előjeleinek szorzatösszege maximális volt (22. ábra, a következő oldalon). A forrás távolságának a meghatározását Matlab 4.2c környezetben futó, saját készítésű programkóddal végeztem.

A meghatározott irányból és távolságból a forrás földrajzi koordinátái levezethetők. A fenti esetben ezek $[4.18^\circ \text{ É}, 10.87^\circ \text{ Ny}]$, ami nyugat-afrikai helyszínt határozna meg (23.a ábra, a következő oldalon). Az eredmény ellenőrizhető pl. földfelszíni villámfigyelő-hálózatok adatai alapján [Cummins et al., 1998; Schulz et al., 2005; Betz et al., 2009; Rodger et al.,



22. ábra: a) A mért hullámimpedancia-spektrum „hasonlósága” (lásd a szövegben) a különböző forrás-észlelő távolságokban modellezett, méréskompatibilis elméleti hullámimpedancia-spektrumokkal, normálva a $[-1, +1]$ intervallumra. **b)** A mérésből származtatott komplex hullámimpedancia-spektrum amplitúdói (folytonos vonal) és a hozzá legjobban „hasonló”, 5.5 Mm forrás-észlelő távolsághoz tartozó, méréskompatibilis elméleti komplex hullámimpedancia-spektrum amplitúdói (szaggatott vonal). Az amplitúdóspektrumokat egységre normáltam.



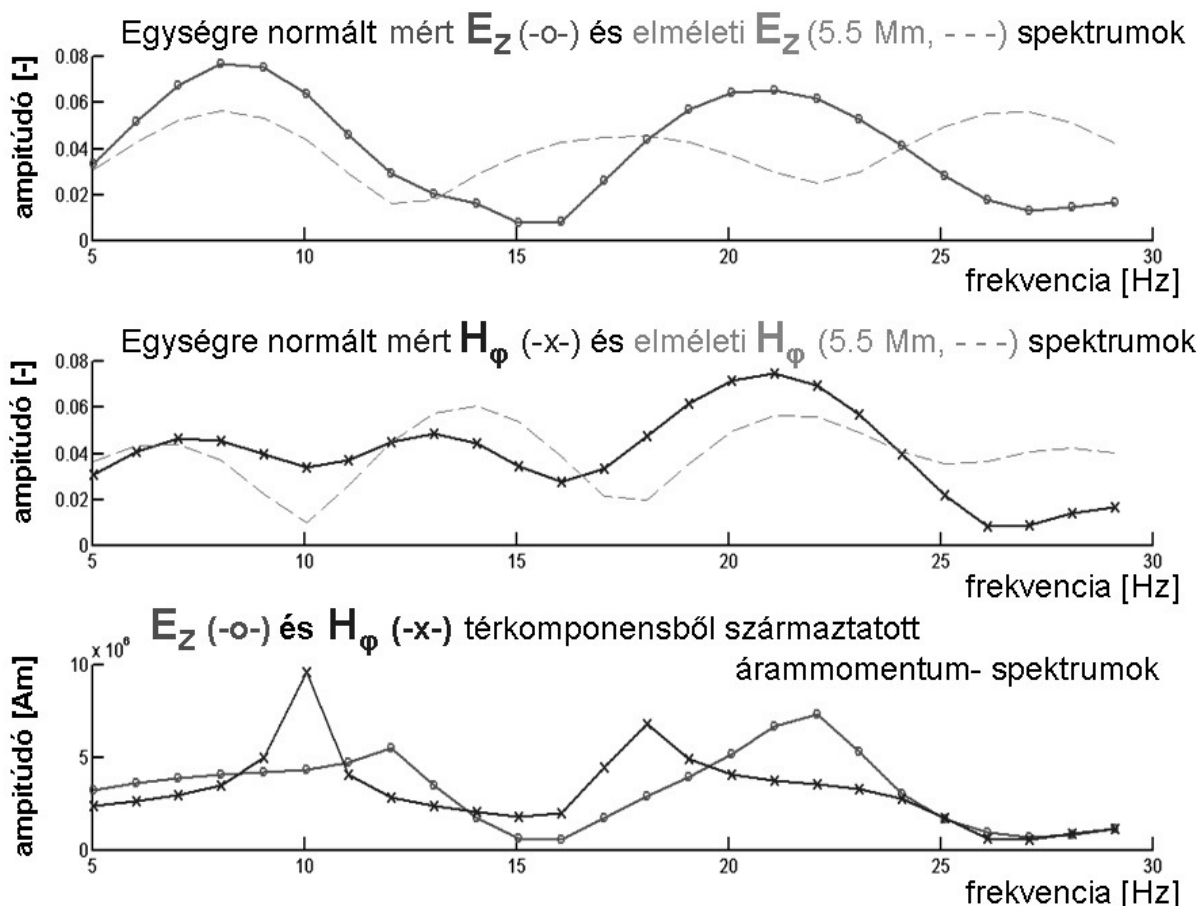
23. ábra: a) A Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium és a vizsgált SRT forrásának a helye $[6.13^\circ \text{ É}, 8.53^\circ \text{ Ny}]$. **b)** Globális infravörös kompozit műholdkép részlete 2003. márc. 31-én 21:00 UTC-kor [SSEC:UW-MADISON, forrás: <http://www.ssec.wisc.edu>]. A nyíllal jelzett helyen aktív zivatarcella működött.

2009], műholdas villámészlelések alapján [Mach et al., 2007], vagy – mint ebben az esetben – kisebb pontossággal műholdas infravörös felvételek alapján (23.b ábra, az előző oldalon). (Az aktív zivatarok műholdas infravörös felvételek segítségével való behatárolását részletesebben az VII.3., „Az emissziókat kiváltó villámkisülések azonosítása” c. fejezetben tárgyalom.) Az alapszemponttal levezetett forráshelyek általános pontossága az iránymeghatározás hibáit is figyelembevéve Boccippio és munkatársainak eredményei alapján 1-2 Mm [Boccippio et al., 1998], de Nakamura és munkatársainak vizsgálata rámutatott, hogy újabb jelfeldolgozási technikák (pl. wavelet analízis) alkalmazásával és a feldolgozási módszer helyes megválasztásával ez a hiba 1 Mm alá csökkenthető [Nakamura et al., 2010]. Az általam alkalmazott eljárás teljesítőképességét és az eredmény pontosságát szemléltetik még a 27., 28., 29. és 30. ábrán (79., 80., 83. és 84. oldal) bemutatott eredmények.

III.9. A forrás vertikális árammomentum-spektrumának és töltésmomentum-változásának meghatározása

A villámkisülések függőleges komponensétől származik a forrástól nagy távolságban is észlelhető SRT-ek energiájának a legnagyobb része [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 3.1. fejezet] (lásd még e dolgozat II.4., „A SRT-ek és a FEOE-k forrásvillámjainak kapcsolata” c. fejezetét), ezért a tranziensekből levezetett értékek a teljes áram-, és töltésmomentum vertikális összetevőjének becslései. A forrás vertikális árammomentum-spektrumának és töltésmomentum-változásának levezetésében Burke és Jones, valamint Huang módszerét követtem [Burke és Jones, 1996; Huang et al., 1999]. Amennyiben a forrás-megfigyelő távolság ismert, a forrás árammomentum-spektruma ($M_I(\omega)$) a térkomponensek mért spektrumának és a forrás-megfigyelő távolsághoz tartozó modell térkomponens-spektrumnak a hányadosaként előállítható (ω a körfrekvencia). (A modell térkomponens-spektrumok előállítását a „A forrás távolsága” c. előző szakaszban részleteztem). Az osztást csak azokon a frekvenciákon lehet elvégezni, ahol spektrális információ ténylegesen rendelkezésre áll, azaz az 5-30 Hz-es átviteli sávon belül, a mágneses térkomponensek esetén szükség szerint a lyukszűrő 15.6-17.5 Hz-es szűrési tartománya kivételével (24. ábra, a következő oldalon).

A kisülés töltésmomentuma (M_Q) az árammomentum integrálja a kisülés ideje alatt. A direkt integrálás a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumból származó adatok esetében nem ad megbízható eredményeket, mivel a tranziens spektrumának csupán egy szelete ismert.



24. ábra: A bemutatott SRT mért és a meghatározott forrás-észlelő távolsághoz tartozó modell térkomponens-spektrumai, valamint az ezek hányadosából levezetett forrásárammomentum-spektrumok.

A direkt integrálás helyett a SRT-ek forrásairól rendelkezésre álló tapasztalatokat felhasználva (II.4., „A SRT-ek és a FEOE-k forrásvillámainak kapcsolata” c. fejezet) feltételezhetjük, hogy a forráskisülés árama egy impulzív csúcs (a fővillám) után lassabban, időben exponenciális függvény szerint csökken (fennmaradó áram), azaz az árammomentum változása $M_I(t) = M_{I0} \exp[-t/\tau]$, ahol M_{I0} a maximális árammomentum a $t=0$ időpontban és τ az exponenciális csökkenés időállandója. A kifejezés analitikus Fourier-transzformáltja előállítható és energiaspektruma a frekvencia függvényében a következő alakba írható:

$$|M_I(f)|^2 = \frac{M_{I0}^2}{(2\pi f)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2}$$

Ezt a függvényt illeszthetjük a mért térkomponensekből levezetett árammomentum-amplitúdóspektrumok négyzetére. A töltésmomentum az illesztett paraméterekből (M_{I0} és τ) $M_Q = M_{I0} \cdot \tau$ alakban (ami az exponenciális függvény $0 \leq t < \infty$ tartományon vett analitikus integrálja) egyszerűen számolható.

Az exponenciális függvény energiaspektruma egyszerűen linearizálható, így törtkifejezés illesztése helyett a problémát reciprokképzéssel egyenesillesztésre vissza lehet vezetni:

$$\frac{1}{|M_I(f)|^2} = \left(\frac{2\pi}{M_{I0}} \right)^2 f^2 + \left(\frac{1}{M_{I0}\tau} \right)^2$$

Ha az árammomentum-spektrumok négyzetének a reciprokát a frekvencia négyzetének a függvényében vesszük fel, az egyenes meredekségéből $((2\pi/M_{I0})^2)$ és tengelymetszetéből $(1/(M_{I0}\tau)^2)$ az időállandó és a maximális árammomentum kifejezhető, amelyekkel a becsült töltésmomentum kiszámítható.

Az exponenciális spektrumillesztéskor, illetve az egyenesillesztésben a hibák és bizonytalanságok másképpen jelentkeznek, ezért a két módszerrel nem teljesen azonos eredmények adódnak. A gyakorlatban a kétféle illesztésből származó eredmények átlagát fogadtam el a töltésmomentum becslésének. Az egyenesillesztéses eljárás különösen alkalmas arra, hogy a módszer alkalmazhatóságát igazolja a konkrét tranziens esetében. Amennyiben az illesztett egyenes meredeksége, vagy a tengelymetszete negatív, az az észlelt tranziens nem reguláris jellegére utal, ami egyébként a polaritás, a forrásirány, illetve forrástávolság meghatározását nem feltétlenül befolyásolja. A tranziens irregularitása legtöbbször azt jelenti, hogy a forrás árammomentumának menete jelentősen eltér az exponenciálistól. Ebben az esetben töltésmomentum a fenti módszerrel nem meghatározható.

A töltésmomentum becslésére egy másik lehetőséget kínál, ha a forrás árammomentumának lecsengését időben nagyon gyorsnak feltételezzük (ún. impulzusforrás-közelítés). Az időtartományban impulzus alakú jel spektruma konstans és ez a konstans spektrális amplitúdó elvileg a töltésmomentum értékét közelíti minden frekvencián:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} (M_I(f)) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{M_{I0}}{i2\pi f + \frac{1}{\tau}} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{M_{I0}\tau}{i2\pi f\tau + 1} \xRightarrow{2\pi f\tau \ll 1} M_{I0}\tau = M_Q$$

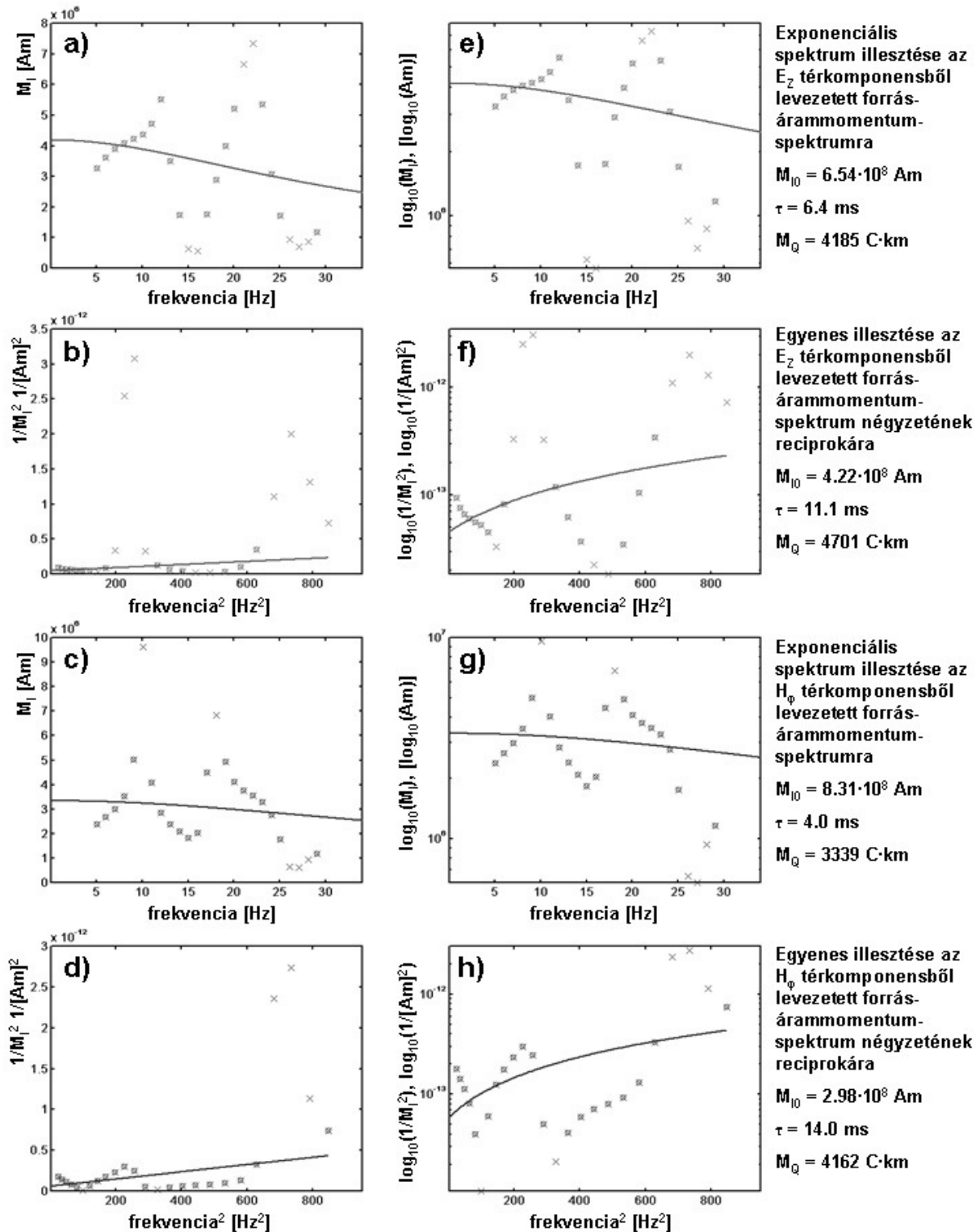
A fenti kifejezésben $i = \sqrt{-1}$ a képzetes egység. A gyakorlatban a mért árammomentum-spektrumok alacsony frekvenciás részének spektrális amplitúdóit használják az töltésmomentum becslésére. Az impulzusforrás-közelítéssel kapott érték időben ténylegesen exponenciális áramerősség-csökkenés esetén alsó korlátját adja a valódi töltésmomentumnak. Az impulzusforrás-közelítéssel kapott eredmények elsősorban kisebb sávszélességű SR mérőrendszerek esetén jó egyezést mutatnak az exponenciális spektrumillesztéssel kapott értékekkel [Huang, 1998]. Ennek az az oka, hogy alacsonyabb frekvenciákon és kisebb

sávszélességnél a spektrum kevésbé érzékeny a forrásfolyamatok gyorsabb időbeli változásaira, és így az ilyen mérőrendszer szempontjából a beérkező hullámcsomag valóban impulzus jellegű [Cummer, 2003; Cummer, 2006].

Számos SRT esemény feldolgozásánál tapasztaltam, hogy a levezetett árammomentum spektrumok a frekvencia függvényében hullámzóak (70. oldal, 24. ábra). A hullámlás oka, hogy a mért és a modell térkomponens-spektrumok csúcsai és minimumhelyei legtöbbször nem teljesen esnek egybe, valamint általában a két spektrum amplitúdói sem egyformán arányosak. A hányadosképzés után így hullámos függvényt kapunk. Egy hullámos árammomentum-spektrumra illesztett, kevésbé változó exponenciális, illetve egyenes függvények illeszkedése gyengébb. Ez a levezetett töltésmomentum értékek bizonytalanságát növeli, a módszer alkalmazhatóságát azonban nem befolyásolja. Az árammomentum-spektrum hullámossága viszont jelentősen torzíthatja az impulzusforrás közelítésben kapott töltésmomentum becsült értékeit, ezért ezt az eljárást az idősorok feldolgozásánál nem alkalmaztam.

Az árammomentum-spektrum kiugróan magas vagy alacsony értékei a mért és a modellspektrumok arányának jelentősebb eltérését jelzik. Ez azonban nem jelenti automatikusan azt, hogy a tárgyalt módszer nem alkalmazható a töltésmomentum meghatározására. Amennyiben a mért és az elméleti térkomponens-spektrumok nagyon különbözőek, akkor természetesen ez a helyzet. Ha azonban a mért és az elméleti térkomponens-spektrumok lényegében együtt futnak, csak a csúcsok helyzetében van eltérés, akkor az árammomentum-spektrum kiugró értékei azokról a frekvenciaszakaszokról származnak, amelyeknél a spektrális amplitúdó gyorsan változik az egyik (pl. a mért) térkomponens-spektrumban és azt a másik (pl. a modell) spektrum csak némi késéssel követi. A spektrális csúcsok kis eltolódása is jelentősen kiugró értékeket eredményezhet a hányadosképzés miatt. Ilyen esetben a kiugró értékeket az árammomentum-spektrumból el kell távolítani, különben azok az illesztést jelentősen befolyásolnák. A regulárisan viselkedő adatpontokra azután elvégezhető az illesztés és a forrás töltésmomentum-változása a szokásos módon megállapítható. A kiugróan nagy amplitúdók felismerése az árammomentum-spektrumok lineáris skálázású ábrázolásában könnyebb, míg a kiugróan alacsony értékek a logaritmikus ábrázolásmódban tűnnek fel jobban (25. ábra, a következő oldalon).

A vertikális elektromos, illetve a horizontális mágneses térkomponens adatsorából két független árammomentum-spektrum és ezekből a különböző illesztésekkel további két-két töltésmomentum becslés kapható. Az elektromos és mágneses komponensekből levezetett értékek egyezése a mérőrendszer kalibrációjának, illetve a töltésmomentumot és az árammo-



25. ábra: A bemutatott SRT töltésmomentumának meghatározása a vertikális elektromos és a horizontális mágneses térkomponenseiből levezetett árammomentum-spektrumokból exponenciális spektrum (a,e,c,g), illetve egyenesillesztéssel (b,f,d,h). Az a,b,c,d panelen lineáris skálázású az ordináta tengely, az e,f,g,h panelen pedig logaritmus skálázású. \boxtimes szimbólumok jelzik azokat a pontokat, amelyekre a görbék illesztése történt, míg az \times -el jelölt pontokat kihagytam az illesztésből. M_{l0} az illesztett exponenciális függvény amplitúdója, τ az időállandója, M_Q a becült töltésmomentum-változás.

mentum-spektrumot előállító módszer jóságának mutatója (25. ábra, az előző oldalon).

A bemutatott SRT forrásának töltésmomentum-változása a négy kvázi-független eredmény átlagával becsülhető, ebben az esetben $4100 \text{ C}\cdot\text{km} \pm 20\%$ -nak adódik. (Ez az érték nem tartalmazza a földfelszín alatti tükörtöltéscentrum kisüléséből származó töltésmomentum-változást.) A bemutatott példa jól jellemzi ennek a módszernek az előnyeit és korlátait. A kb. 20%-os bizonytalanság jellemző az ezzel a módszerrel meghatározott töltésmomentum-értékeknél.

Az eredmény közvetlen töltésmomentum-mérés hiányában nem ellenőrizhető, azonban az így levezetett értékek más forráskisülések párhuzamosan észlelt SRT-eiből különböző obszervatóriumokban, eltérő módszerekkel meghatározott töltésmomentum-változásokkal jól egyeznek, ami az eljárás alkalmazhatóságát igazolja [Williams et al., 2010] (részletesen tárgyalva a V.4., „*FEOE észlelések Afrika fölött*” c. fejezetben).

A forrás árammomentum-spektrumának a meghatározását és ebből a kisülés során bekövetkező töltésmomentum-változás becslését Matlab 4.2c környezetben futó, saját készítésű programkóddal végeztem. Az exponenciális amplitúdóspektrum illesztését a programcsomag *fmins* rutinjával hajtottam végre, amely több paraméter optimalizációját simplex algoritmussal végzi. Az egyenes illesztését a legkisebb négyzetes eltérések minimalizálásának elve alapján hajtottam végre.

IV. A nappali-éjszakai terminátorvonalhoz viszonyított forrás- észlelő geometria szerepe a SRT-ekből levezetett árammomentum-spektrumok amplitúdóinál

IV.1. Motiváció és kutatási előzmények

Az egyszerű SR modellekben a Föld-ionoszféra hullámvezető gömbszimmetrikus rendszer. A valóságban a tökéletes gömbhéjszimmetriát megtörik az alsó ionoszféra különböző globális laterális egyenetlenségei. Ezek közül a legszembevetőbb az ionoszféra nappali-éjszakai aszimmetriája, továbbá a poláris sapkák fölötti ionoszférikus inhomogenitás, valamint a geomágneses tér által okozott vezetőképességi anizotrópia.

A poláris sapkák fölötti ionoszférikus inhomogenitás egyrészt a napsugárzás beesési szögének földrajzi szélesség szerinti változásából adódó ionizációs különbségekből adódik, másrészt a naptevékenység olyan alkalmoszerű eseményeinek a hatásából tevődik össze, amelyek a geomágneses térrel való kölcsönhatás miatt a pólusok közelében érvényesülnek a leginkább (pl. a napkitörésekhez kapcsolódó proton események: SPE – Solar Proton Event [Nickolaenko és Hayakawa, 2002, 6.4. fejezet]). A globális léptékben dipólustérrel közelíthető geomágneses tér hatása a földrajzi és a geomágneses pólusok közelsége révén alapvetően észak-déli irányú ionoszférikus anizotrópia. A vertikális mágneses komponens a sarkok közelében érvényesül inkább és így a poláris inhomogenitáshoz járul hozzá. A nappali és éjszakai (alsó) ionoszféra közötti különbség ezzel szemben kelet-nyugat irányban karakterisztikus és viszonylag gyors átmenetekkel bíró aszimmetria. Az éjszakai oldalon nem érvényesül a Nap ionizáló sugárzása, ami az ionoszféra legalsó rétegének a feloszlását eredményezi. A nappali oldalon az ionoszféra alsó határa kb. 50-60 km, míg az éjszakai oldalon kb. 90 km magasan húzódik, és a vezetőképesség magasságfüggése is eltérő.

A Föld-ionoszféra hullámvezető laterális inhomogenitásának a háttér SR paraméterekre és a háttér SR spektrumra gyakorolt hatását elemző korábbi elméleti megfontolásokat [Nickolaenko és Hayakawa, 2002] 2.8 és 2.9. fejezetei foglalják össze; speciálisan a nappali-éjszakai aszimmetria következményeinek a modellezésével az 5.1.3, és részben az 5.2.6 fejezet foglalkozik részletesen. Ugyanolyan forrást feltételezve vizsgálták az ELF hullámok terjedését a nappali-éjszakai terminátorvonallal párhuzamosan és arra merőlegesen is mind nappali, mind éjszakai oldalon levő forrás esetén, különböző terminátorvonal-szélességeket véve. A modellezés eredményei szerint a megfigyelő legfeljebb 5%-nyi, a nappali-éjszakai aszimmetria hatásának tulajdonítható változást észlelhet az ELF jelek amplitúdóiban. A jelamplitúdók a terminátor nappali oldalán a modellek eredményei alapján kisebbek a nagyobb elektronsűrűség miatti jelentősebb csillapítás következményeként. A terminátorvonal hatását továbbá elhanyagolhatónak találták minden olyan konfiguráció esetén, amikor a terminátor áthalad a forrás-észlelő távolság felezőpontján. A SR amplitúdók különböző mérőállomásokon észlelt napi menetét a modell gyakorlatilag teljesen visszaadta a globálisan domináns forrásterületek aktivitásváltozásainak figyelembevételével.

A mérési tapasztalatok azonban ellentmondani látszanak az elméleti eredményeknek. Sentman és Fraser az USA-ban és Ausztráliában működő távoli ELF állomások adatait összehasonlítva a mért jeleket befolyásoló globális és helyi hatásokat különböztetett meg. A mérést leginkább befolyásoló helyi tényezőt az ionoszféra D tartományának aktuális lokális magasságával azonosította [Sentman és Fraser, 1991]. Az eredmény összefüggése a nappali-

éjszakai aszimmetriával kérdéses maradt, miután Pechony és Price a lokális tényező hatását gömbszimmetrikus modellben pusztán a forrás-észlelő geometria változásaival is elő tudta állítani [Pechony és Price, 2006]. Melnikov és munkatársai több SR állomás órás adatai alapján azt találták, hogy a felszíni napfelkelte/naplemente órájában hirtelen, mintegy 20 %-os SR amplitúdónövekedés / -csökkenés következik be az első rezonancia-módus esetében és az elugrás mértéke nő a második és harmadik rezonancia-módusnál [Melnikov et al., 2004]. Satori és kollégái több közepes szélességeken fekvő és egy, az északi pólushoz közeli SR állomásról származó, nagy időfelbontású spektrális amplitúdóadatok alapján megállapították, hogy az „óramű-pontossággal” bekövetkező SR amplitúdónövekedések, illetve -csökkenések mindig az ionoszférikus napfelkelte/naplemente időpontjában következnek be. Méréseik alapján az első három SR módus amplitúdójában az ionoszférabeli napfelkelte idején ~16%, ~20% és ~25% növekedést, naplementekor ~14%, ~17% és ~23% csökkenést tapasztaltak. A pólushoz közeli SR állomáson nem tapasztaltak ilyen jellegű változást a teljes nappal, illetve a teljes éjszaka időszakában [Satori et al., 2007]. Pechony és munkatársai a SR háttérrel egyedi kisülések jeleinek a szuperpozíciójaként állították elő a nappali-éjszakai aszimmetriát tartalmazó és azt nélkülöző Föld-ionoszféra modellrendszerben. Eredményeik szerint 10%-nyi amplitúdóváltozás magyarázható a nappali-éjszakai aszimmetria hatásával, azonban a domináns szerepet a források intenzitásának és megfigyelőtől való távolságának a változásai játsszák a SR amplitúdók napi menetének a kialakításában [Pechony et al., 2007]. Yang és Pasko a véges differenciák módszerével követték modelljükben a terjedésük közben időben változó ELF hullámformák alakulását. Az eljárás különösen alkalmas rá, hogy a hullámvezető különböző, globális vagy akár lokalizáltabb anomáliáinak az ELF hullámcsomagra gyakorolt hatását vizsgálják [Yang és Pasko, 2006]. Eredményeik alapján az ionoszféra alsó határrétegének a megfigyelőhely fölötti magassága egyértelműen befolyásolja a megfigyelt SR csúcsok amplitúdóját. Az analizált jelek magnitúdójában 60%-os, egyébként a földrajzi hosszúságtól is függő emelkedést találtak a helyi ionoszférikus napfelkelte idején és csökkenést alkonyatkor, de ebben a változásban a globális zivatar-tevékenység befolyását is jelentősnek találták.

Annak a kérdésnek a megválaszolására, hogy a nappali-éjszakai aszimmetria önmagában milyen hatással van a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjedő hullámok amplitúdójára, kézenfekvő megoldást kínál a SRT-ek vizsgálata. Ugyanannak a forrásnak az ELF jeleit a nappali és az éjszakai oldalon is észlelve mindkét regisztrátumból levezethetők a forrás tulajdonságai, pl. a (vertikális) árammomentum-spektruma. Amennyiben a forrás árammomentum-spektrumának amplitúdóiban uniform, gömbszimmetrikus hullámvezető-

modellt feltételezve szisztematikus különbség adódik, az csak a figyelmen kívül hagyott nappali-éjszakai aszimmetria hatásának tulajdonítható, mivel egy-egy tranzien্স lecsengése alatt a globális zivatar-tevékenység elhanyagolható mértékben változik.

A FEOE-k tulajdonságainak a vizsgálata szempontjából a kérdés megválaszolása azért bír jelentőséggel, mert az alkalmazott gyakorlat szerint a villámkisülések töltésmomentumainak SRT-ekből való meghatározásánál gömbszimmetrikus hullámvezető-modelleket alkalmaznak Nyikolajenko és munkatársainak modellezési eredményeire való tekintettel. Amennyiben a nappali-éjszakai terminátorvonalon való áthaladás módosítja a levezetett árammomentum-spektrumokat, az a töltésmomentumok értékét is torzíthatja, amit az eredmények helyes értelmezéséhez figyelembe kell venni.

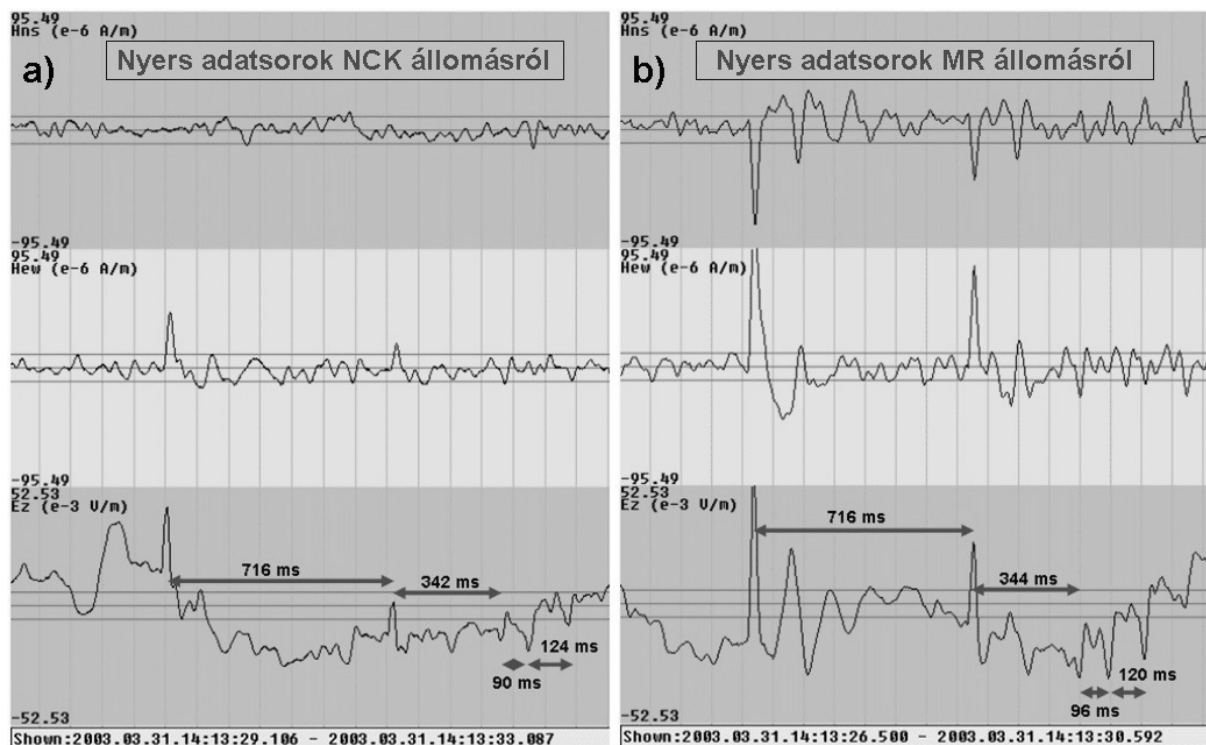
IV.2. MÉRŐÁLLOMÁSOK ÉS A SRT-EK KIVÁLASZTÁSA

A vizsgálat elvégzéséhez intézetünk Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumának (NCK) [16.7° K, 47.6° É] adatai, illetve az izraeli Negev-sivatagban, Mitzpe Ramon városka mellett, a Tel-Avivi Egyetem Asztronómiai Állomásának részeként működő ELF mérőállomás (MR) [34.8° K, 30.6° É] idősorai álltak rendelkezésre. Az elemzéshez felhasznált adatokat 2003. május 31. délutánjának folyamán, 13:00-19:20 UTC (világidő, az angol „Coordinated Universal Time” és a francia „Temps Universel Coordonné” összevonásából) között rögzítették mindkét mérőhelyen, ebből következően csak a naplementéhez tartozó lehetséges hatásokat állt módomban vizsgálni. Ezen a napon a nappali-éjszakai terminátorvonal két mérőállomáson való áthaladása között 1 óra és 22 perc telik el, ami elég időt biztosít mindkét állomáson rögzített SRT-ek kereséséhez olyan konfiguráció esetén is, amikor MR fölött már kialakult az éjszakai ionoszférikus vezetőképességi profil, NCK fölött pedig még nappali állapotok uralkodnak.

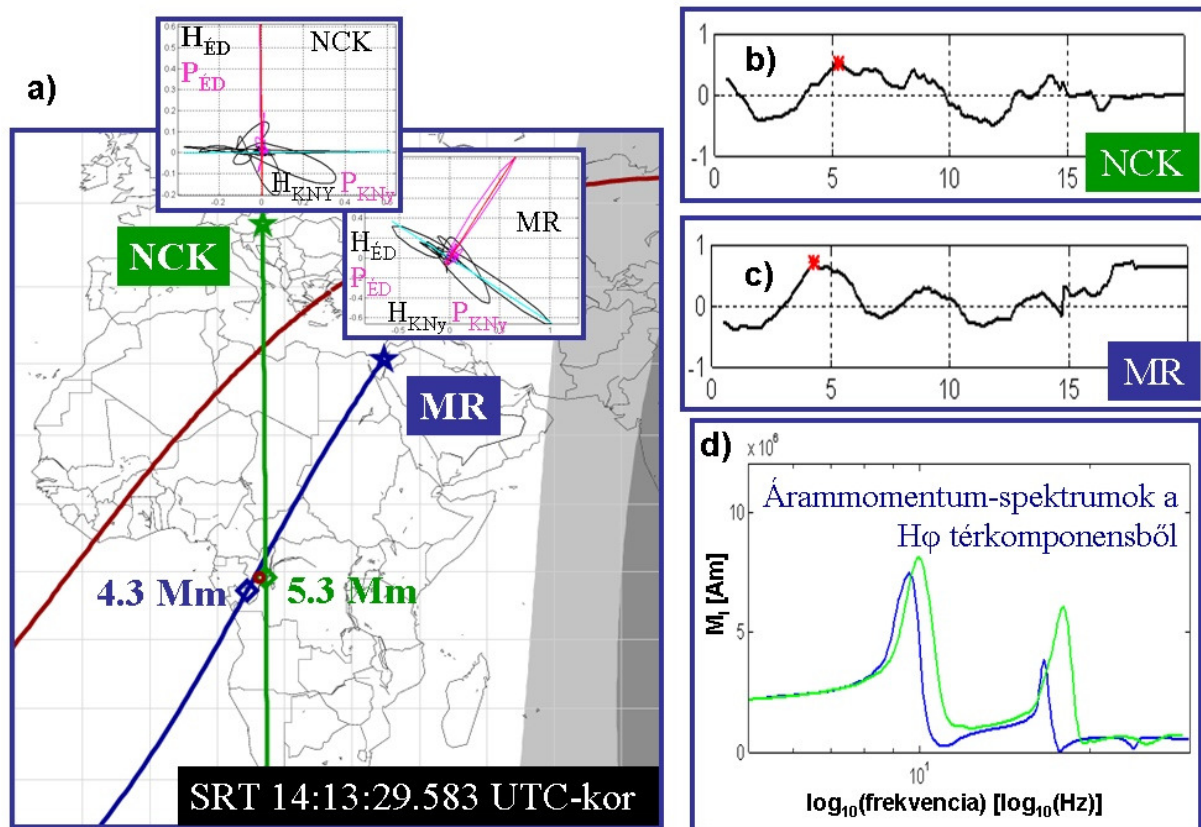
Mindkét állomás adatsoraiban kölcsönösen észlelt SRT-eket kerestem a mérőhelyek nappali-éjszakai terminátorvonalhoz viszonyított különböző elhelyezkedési konfigurációinál: NCK és MR is a nappali féltekén helyezkedik el, NCK felett nappali ionoszféra, míg MR fölött éjszakai ionoszféra található, és végül az állomások egyidejűleg éjszakai ionoszféra alatti elhelyezkedése esetén. Intézetünk obszervatóriumában ezredmásodperces pontossággal rendelkezésre állt az adatok rögzítési ideje, Izraelben azonban abban az időben egy külső GPS óra alapján kézzel indították a mérést, ami eleve eltérést jelentett az adatsorokhoz rendelt időinformációhoz képest. Az izraeli adatgyűjtőszoftver működési sajátágaiból adódóan a

hiba nem maradt állandó, hanem a hosszabb mérés alatt nem lineárisan több másodpercesre duzzadt. Ez megnehezítette a közösen észlelt eseményeknek az észlelési időpontjuk alapján történő azonosítását. A nagycenki és az izraeli idősorok illesztéséhez ezért az észlelési időpont helyett a különböző jelváltozások megjelenésének időben hasonló mintázatát használtam fel (26. ábra). Az idősorok hasonló mintázatának felismerését segítette, hogy a két mérőállomáson ugyanazokat a térkomponenseket rögzítik és az alkalmazott antennák (gömbantenna és indukciós szondák) valamint a mérőrendszerek átviteli tulajdonságai (NCK: 5-30 Hz, MR: 2.5-41 Hz) hasonlóak.

Az analízishez olyan SRT eseményeket igyekeztem találni, amelyek mentesek a különböző jeltorzulásoktól és spektrális zavaroktól. A nem megfelelő események kiszűrése a jelfeldolgozás során volt lehetséges. Az idősorok feldolgozásának menetét a III., „SRT-ek regisztrálása és feldolgozása a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban” c. fejezetben ismertettem. A mágneses tér, illetve a Poynting-vektor horizontális komponenseinek a hodogramja több, különböző forrásból származó SRT jel átlapolódását mutathatja meg, a mért hullámimpedancia-spektrumnak a modellspektrumokkal való összehasonlításából pedig kiderül, hogy mely tranziensek esetén nem egyértelmű a távolság meghatározása.



26. ábra: NCK és MR állomáson rögzített adatsorok időbeli illesztése közösen regisztrált SRT-ek szekvenciái alapján. H_{ns} és H_{ew} a mágneses tér észak-déli és kelet-nyugati horizontális komponenseinek, E_z a vertikális elektromos térkomponensnek az idősorait jelöli. Az E_z adatsorokban a hullámváz a helyi időjárási viszonyok miatt van jelen: mindkét állomáson széles volt az idő.

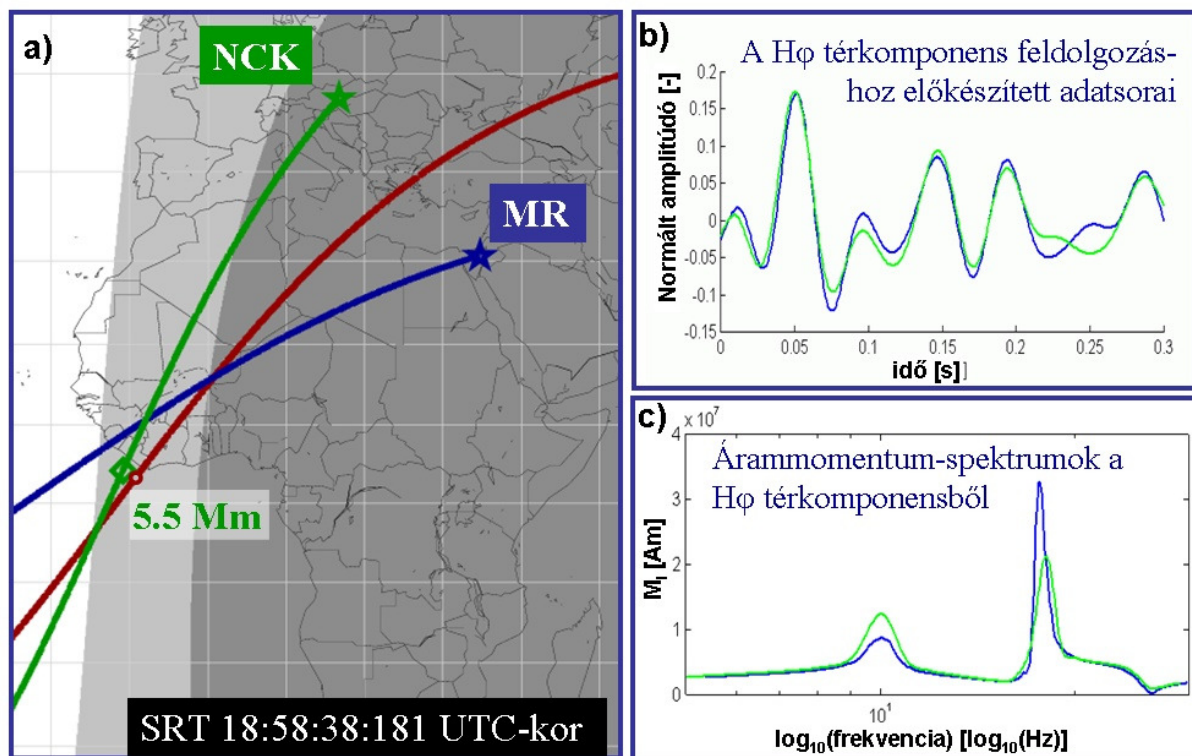


27. ábra: a) 2003. március 31-én észlelt SRT forráshelyének meghatározása NCK (zöld csillaggal jelölve) és MR (kék csillaggal jelölve) állomáson. A beágyazott kis képeken a mágneses tér és a Poynting-vektor horizontális komponenseinek a hodogramjai láthatók. A zöld és kék vonalak az állomásoktól a meghatározott forrásirányban húzódnak, rajtuk rombusz jelöli a levezetett távolságot, amelyet az ábrán számszerűen is feltüntettem. A piros vonal a két állomástól egyenlő távolságban levő pontokat jelöli. A piros korong a forrás elfogadott pozícióját mutatja. A fehér-világosszürke területek közötti határvonal a földfelszínen húzódó nappali-éjszakai terminátorvonal. A sötétszürke területek fölött stabilizálódott éjszakai ionoszféra található. b) és c) a SRT komplex impedanciaspektrumának és a modellspektrumoknak a „hasonlóság” indexe a forrás-észlelt távolság (Mm-ben) függvényében a két állomáson. d) a forrás NCK (zöld) és MR (kék) állomáson levezetett árammomentum-spektrumai.

Tekintettel arra, hogy mind a két mérőállomáson a vertikális elektromos mellett a horizontális mágneses tér komponenseit is regisztrálták, az egyes állomásokon rögzített adatsorokból külön-külön is meg lehetett határozni a forrás földrajzi helyzetét. A további vizsgálatba csak olyan SRT eseményeket vontam be, amelyeknél a két állomáson meghatározott forráshelyek eltérése 1 Mm-nél kisebb volt (27a-b-c. ábra).

A felszíni naplemente 2003. március 31-én 15:59 UTC-kor következett be MR állomáson. A SRT-ek első csoportját ez időpont előtti események alkotják; ekkor mindkét megfigyelőhely a nappali féltéken helyezkedett el. Mindössze 10 SRT felelt meg a válogatás követelményeinek a megfigyelési kampány kezdetétől számított 3 óra alatt. A további elemzésre alkalmas események csekély száma a globális zivatartevékenység aznap szokatlanul alacsony aktivitásának valamint a viszonylag zavart, szeles helyi időjárási viszonyoknak tudható be.

A felszíni naplemente után alig 20 perccel az ionoszférában is elkezdődnek az változások. A D tartomány feloszlása a besugárzás csökkenésével viszonylag hamar megtörténik és kb. 20-30 perc múlva az ionoszférában gyakorlatilag stabilizálódik az éjszakára jellemző állapot [Sátori et al., 2007]. A felszíni naplemente után kb. 50 perccel tehát biztosak lehetünk benne, hogy az obszervatórium fölött az ionoszférában is éjszaka van. MR állomáson ez 2003. március 31-én kb. 16:50-re tehető. A Széchenyi István Obszervatóriumban a felszíni naplemente időpontja ezen a napon 17:21 UTC-re esett. Szigorúan véve ezért 20-30 perc volt az az idő, amikor NCK állomás még nappali ionoszféra alatt helyezkedette el, MR fölött pedig biztosan éjszakai viszonyok voltak. Ez alatt az idő alatt 8 alkalmas eseményt sikerült találni. Az előző időszakhoz képest az alkalmas események nagyobb száma egyszerűen annak tudható be, hogy időközben NCK állomás fölött elállt a szél.



28. ábra: a) 2003. március 31-én észlelt SRT NCK (zöld csillaggal jelölve) és MR (kék csillaggal jelölve) állomáson meghatározott forráshelye. A zöld és kék vonalak az állomásoktól a meghatározott forrásirányban húzódnak, rajtuk rombusz jelöli a levezetett távolságot, amelyet az ábrán számszerűen is feltüntettem. MR állomás esetében csak a horizontális mágneses térkomponens volt elérhető. A piros vonal a két állomástól egyenlő távolságban levő pontokat jelöli. A piros korong a forrás elfogadott pozícióját mutatja. A fehér-világosszürke területek közötti határvonal a földfelszínen húzódó nappali-éjszakai terminátor vonal. A sötétszürke területek fölött stabilizálódott éjszakai ionoszféra található. b) a SRT horizontális mágneses térkomponensének jelfeldolgozáshoz előkészített idősorai NCK (zöld) és MR (kék) állomáson. c) a forrás NCK (zöld) és MR (kék) állomáson levezetett árammomentum-spektrumai.

Az előzőekben ismertetett megfontolások alapján 18:20 UTC utánra tehetjük, amikor mindkét mérőhely fölött bizonyosan éjszakai ionoszféra volt található. A közös megfigyelési

időszak végéig hátramaradó szűk órában mindössze három eseményt sikerült találni, ami a kiválasztási feltételeknek megfelelt. Ez csupán részben írható az aznap délutánra általánosan jellemző alacsony globális zivatar aktivitás rovására. MR állomáson továbbra is zavartak maradtak a helyi időjárási viszonyok (gyakorlatilag nem állt el a szél) olyannyira, hogy a vertikális elektromos tér észlelése az ionoszférikus naplemente után nem sokkal teljesen megszűnt. Ezután nem volt lehetséges a forrás földrajzi helyének levezetése és így a tranziensek alkalmasságának az ellenőrzése sem. Egyetlen olyan eseményt vittem csak tovább azok közül, amelyekhez nem volt vertikális elektromos adat. Ennél a horizontális mágneses térkomponens normált idősora és spektruma az NCK-ban megfigyelttel szinte teljesen azonos volt. Ez a forrásnak a két mérőállomástól való azonos távolságára utalt. A NCK adatsorból levezetett forráskoordináták egybeestek a két állomástól azonos távolságra levő pontok egyikével Nyugat-Afrikában (28.a-b ábra, az előző oldalon) és azon a helyen infravörös sávban észlelő műholdak képe valóban zivatargócot mutatott (68. oldal, 23. ábra). Ez az esemény ugyanaz, amelyen a jelfeldolgozást szemléltettem (III., „*SRT-ek regisztrálása és feldolgozása a Széchenyi István Geofizika Obszervatóriumban*” c. fejezet).

IV.3. A különböző mérőállomások adataiból meghatározott forrásárammomentum-spektrumok összehasonlítása

Szinte mindegyik kiválasztott SRT esemény forrásárammomentum-spektrumára négy függvényközelítést vezettem le: egyet a vertikális elektromos és egyet a horizontális mágneses térkomponensből mindkét állomáson. Az ugyanarról az állomásról származó árammomentum-spektrumok amplitúdói nagyságrendileg megegyeztek ugyan, struktúrájuk azonban többnyire jelentősen különbözött. A vertikális elektromos térkomponensből származó árammomentum-spektrumok amplitúdófüggvényei a viszonylag keskeny frekvenciasáv ellenére általában változékonyabbak voltak, az exponenciális spektrum illesztésének módszerével töltésmomentum-számítására sokszor alkalmatlanok. A horizontális mágneses térkomponensből származó árammomentum-spektrumok ezzel ellentétben sokkal regulárisabb menetet mutattak. A spektrumok jellemző menete a mágneses adatoknál jól felismerhető, az amplitúdók anomális viselkedése jellemzően lokalizáltabb volt.

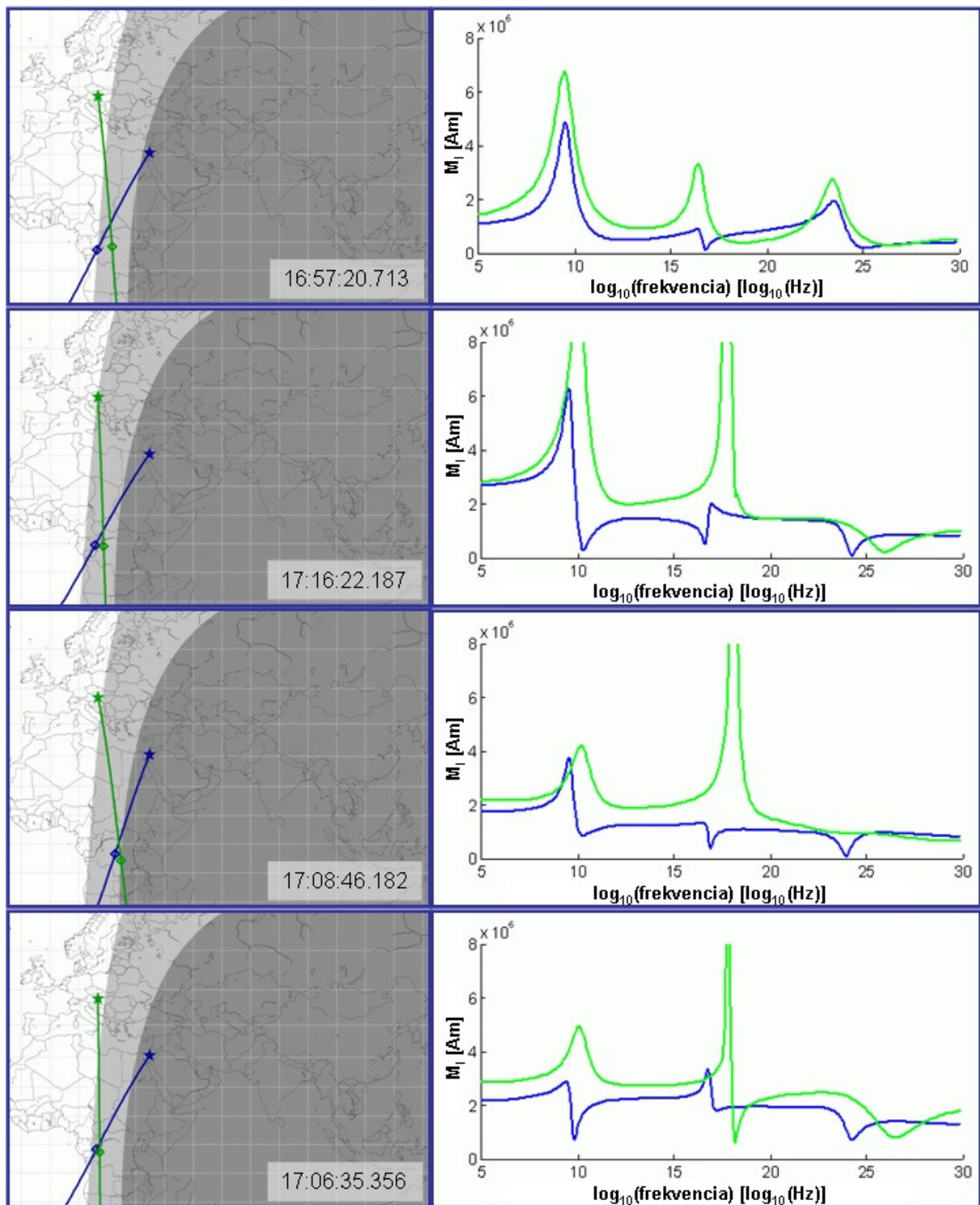
Az események szelektálásánál kritikus feltétel volt, hogy a forrás független adatsorokból meghatározott földrajzi koordinátái gyakorlatilag megegyezzenek, ehhez pedig a

hullámimpedancia-spektrumoknak reguláris szerkezetűnek kellett lennie. Bár a hullámimpedancia-spektrum a vertikális elektromos és a horizontális mágneses tér spektrumainak a hányadosa, a levezetett forráshelyek megegyezése, ugyanakkor az árammomentum-spektrumok minőségének a különbözősége nem feltétlenül ellentmondásos. A forráskoordináták levezetésénél a hullámimpedancia-spektrum gradienseinek a viselkedését használtam fel, míg az árammomentum-spektrum szerkezetét a mért és elméleti spektrumok amplitúdóinak az aránya határozza meg. A gömbantennák szellőkések által okozott potenciálingadozásai (78. oldal, 26. ábra) a vizsgált események esetében jellemzően a spektrális amplitúdókat torzították inkább, míg a távolságra jellemző periodicitás kevésbé változott. A védettebb indukciós szondák adatai ettől a zavartól mentesek és ezért megbízhatóbb információforrásoknak bizonyultak. Ebből kifolyólag csak a horizontális mágneses térkomponensből levezetett árammomentum-spektrumok amplitúdóit vetettem össze.

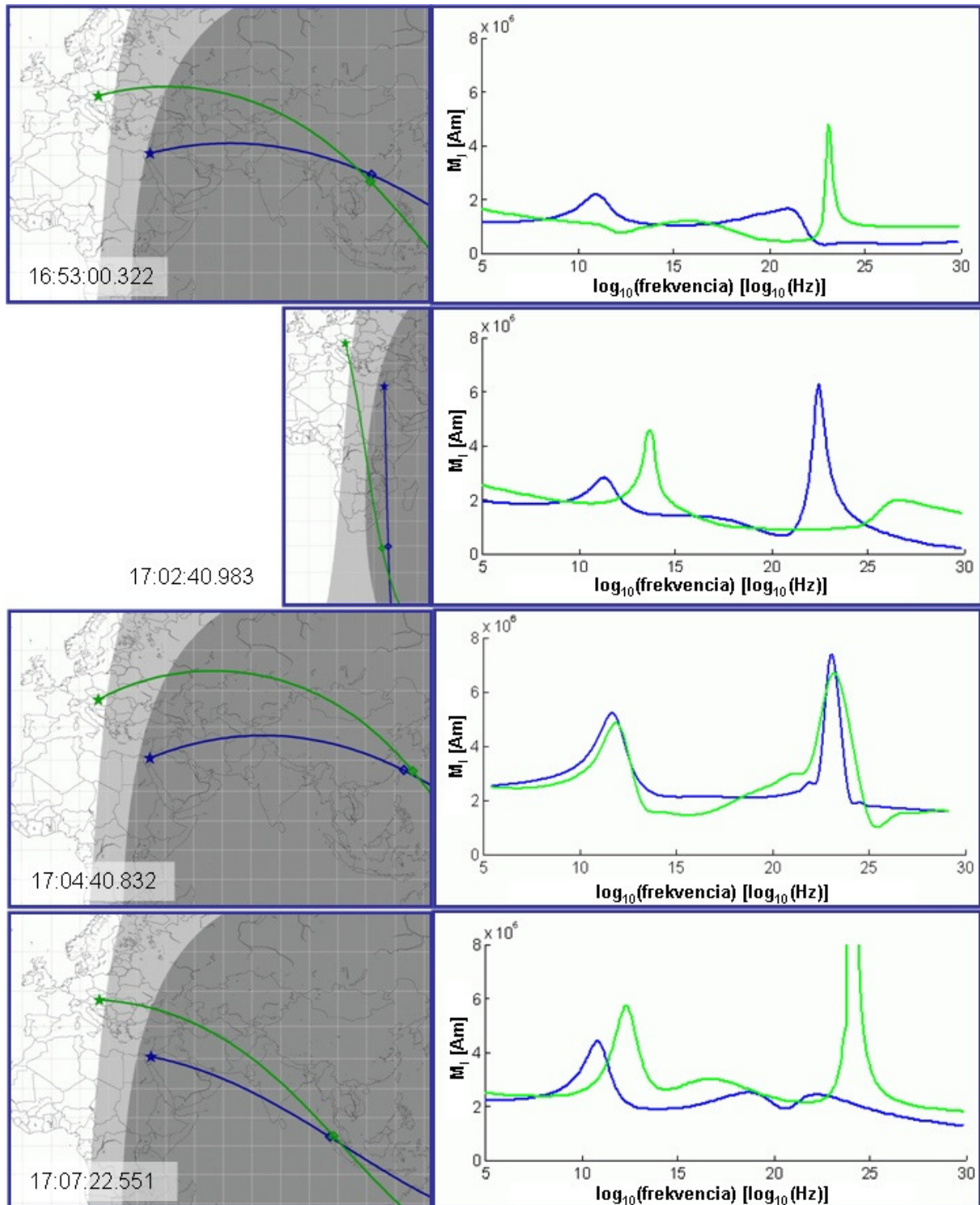
Amikor a megfigyelőállomások a nappali-éjszakai terminátor ugyanazon oldalán helyezkednek el, a levezetett árammomentum-spektrumok egyezése várható. Az első néhány ilyen spektrum összehasonlítása során kiderült, hogy a két állomásról származó spektrális amplitúdók között frekvenciától függő különbség van. A különbségfüggvény eseményről eseményre megegyezett olyannyira, hogy az első három SRT forrás spektrumainak arányából átlagolt korrekciós függvénnyel helyesbítve a további spektrumokat, azok egyezése a két mérőállomáson nyilvánvaló volt. A korrekciós függvény állandósága a két rendszer valamelyikének, vagy mindkettőnek a kalibrációs pontatlanságára utal. Ugyanazt a korrekciós függvényt alkalmazva, a két állomáson levezetett forrásárammomentum-spektrumok megegyeztek függetlenül attól, hogy a forrás nappali (6 esemény) vagy éjszakai ionoszféra alatt (4 esemény) volt aktív (79. oldal, 27.d ábra).

A nappali oldalon levő állomások esetén meghatározott korrekciós függvénnyel módosítva az árammomentum-spektrumokat abban az esetben, amikor mindkét állomás fölött éjszakai ionoszféra húzódott, szintén nagyon jó egyezést találtam (80. oldal, 28.c ábra).

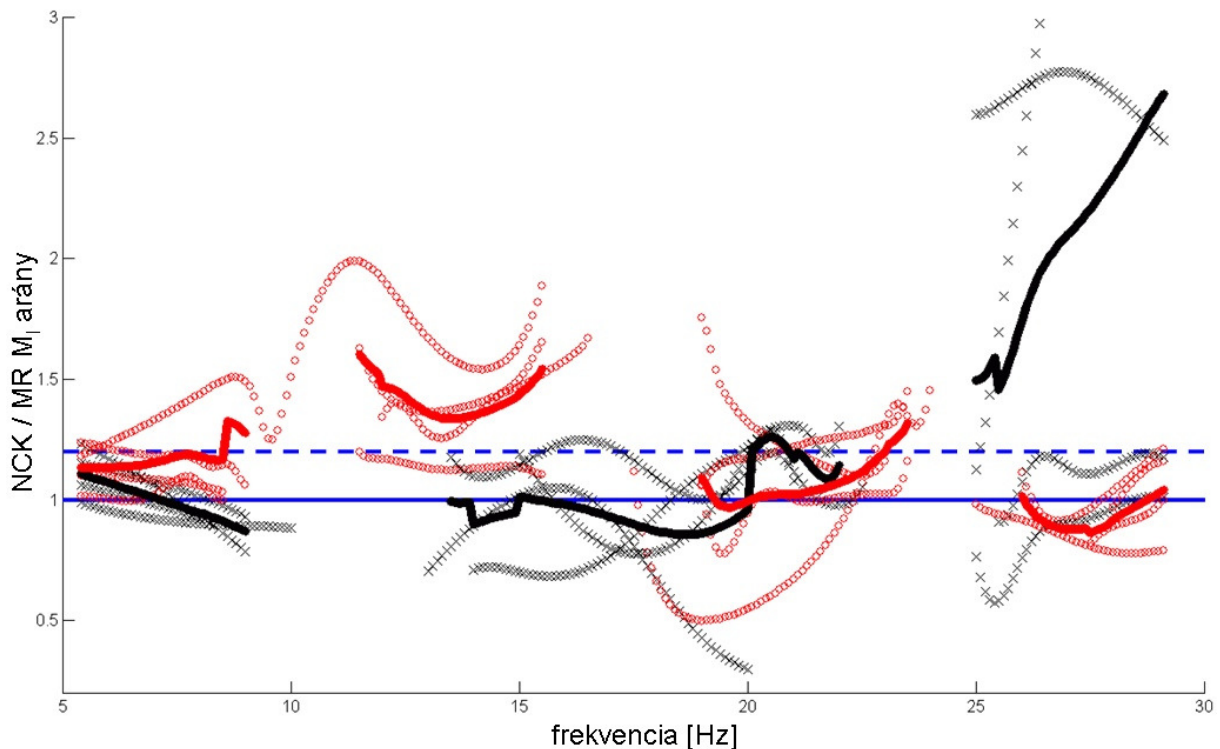
A nyolc olyan SRT esemény közül, amelyeket az állomások a terminátorvonal két ellentétes oldalán észleltek, négynek a forrása a nappali féltekén volt, négyé pedig az éjszakain. A két csoport árammomentum-spektrumainak a különbségei között jellemző és szisztematikus eltérések adódtak. Amikor a forrás a nappali féltekén volt (legalábbis az ionoszférát tekintve), a spektrális amplitúdók különbözősége inkább 5 Hz és 19 Hz között mutatkozott (29. ábra, a következő oldalon), míg ha a forrásvillám az éjszakai féltekén volt, a spektrum amplitúdóinak szétválása kisebb frekvenciákon nem, hanem inkább 25 Hz fölött



29. ábra: Balra: 2003. március 31-én NCK (zöld csillag) és MR (kék csillag) állomásokon meghatározott SRT forrásirányok és forráshelyek azonos színű vonallal és rombusszal jelölve, a SRT NCK állomáson való észlelésének UTC időpontjával. A forrás nappali ionoszféra alatt működött. A fehér-világosszürke területek közötti határvonal a földfelszínen húzódó nappali-éjszakai terminátorvonal. A sötétszürke területek fölött stabilizálódott éjszakai ionoszféra található. **Jobbra:** a megfelelő baloldali esemény NCK (zöld) és MR (kék) állomáson mért horizontális mágneses térkomponenséből levezetett árammomentum-spektrumai.



30. ábra: Balra: 2003. március 31-én NCK (zöld csillag) és MR (kék csillag) állomásokon meghatározott SRT forrásirányok és forráshelyek azonos színű vonallal és rombusszal jelölve, a SRT NCK állomáson való észlelésének UTC időpontjával. A forrás éjszakai ionoszféra alatt működött. A fehér-világosszürke területek közötti határvonal a földfelszínen húzódó nappali-éjszakai terminátorvonal. A sötétszürke területek fölött stabilizálódott éjszakai ionoszféra található. **Jobbra:** a megfelelő baloldali esemény NCK (zöld) és MR (kék) állomáson mért horizontális mágneses térkomponenséből levezetett árammomentum-spektrumai.



31. ábra: 2003. március 31-én NCK és MR állomáson megfigyelt SRT-ek horizontális mágneses térkomponensből meghatározott forrásárammomentum-spektrumainak arányai azokban az esetekben, amikor NCK állomás a nappali, MR állomás az éjszakai féltekén helyezkedett el. Piros karikák jelölik azokat az arányokat, amelyek nappali ionoszféra alatt keletkezett SRT-k forrásaihoz tartoznak (83. oldal, 29. ábra), míg fekete x-ek jelölik az éjszakai ionoszféra alatt keletkezett SRT-ekhez kapcsolódó arányokat (30. ábra, az előző oldalon). Az arányokat nem ábrázoltam a levezetett spektrumok nem valódi csúcsainál. A vastag piros, illetve fekete vonalak a megfelelő színű arányok átlagai azokon a frekvenciákon, ahol legalább két érték rendelkezésre állt. Kék szaggatott vonal jelzi a 20%-os amplitúdónövekedésnek megfelelő szintet.

fordult elő (30. ábra, az előző oldalon). Mindkét esetben azonban átlagosan a nappali oldalon elhelyezkedő állomáson mért értékek adódtak magasabbnak.

Az analízis eredménye azt mutatja, hogy a megfigyelőhely fölötti nappali-éjszakai ionoszférikus különbségek hatással vannak a forrás mérésekből levezetett tulajdonságainak az értékeire. Más oldalról nézve a vizsgálat egyértelműen kimutatta, hogy a SR frekvenciasávban az elektromágneses hullámok mért amplitúdójának változása a helyi napfelkelte, illetve naplemente idején nem magyarázható kizárólag a források intenzitásának és megfigyelőhelytől számított távolságának a változásaival. A globális zivatartevékenység jellemzően a nappali féltekén intenzív, ezért amikor egy mérőállomás átkerül az éjszakai féltekére, az ELF jelek a nappali oldalról a terminátorvonalon áthaladva érnek el hozzá. Ilyen konfiguráció esetén a tranziensek vizsgálata alapján átlagosan kb. 20%-os amplitúdócsökkenés következik be, ami a háttérérések [Melnikov et al., 2004; Satori et al., 2007] eredményeit támasztja alá (31. ábra).

V. FEOE forrásvillámok Sopron mellett észlelt SRT-ekből levezetett töltésmomentumai

Kutatóintézetünk Széchenyi István Geofizikai Observatóriuma Soprontól alig 16 km-re, Nagycenk közelében helyezkedik el. Az obszervatóriumban működő SR mérőállomás antennáinak, mérő- és adatrögzítő rendszerének a tulajdonságait és a SRT-sek mérőállomáson rögzített idősorainak feldolgozási technikáját a III., „*SRT-ek regisztrálása és feldolgozása a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban*” c. fejezetben ismertettem. Az adatsorok rögzítési idejének ezredmásodperces pontosságú ismerete lehetővé teszi a bolygószerte megfigyelt FEOE-k forrásvillámiaihoz tartozó SRT-sek azonosítását az emissziók észlelési időpontja alapján, a FEOE-k megjelenése és a forrásvillámok tulajdonságainak a kapcsolata pedig a tranziensekből levezetett vertikális töltésmomentum-változás alapján elemezhető.

A feldolgozás során könnyebbésséget jelentett, hogy a források koordinátái és így a forrás-észlelő távolságok kellő pontossággal ismertek voltak. Az elemzés során azonban a tranziensekből kapott forrásirányok gyakran nem egyeztek meg a valódi irányokkal és az eltérés alkalmanként több 10 fokot is kitett. A SRT-ekből levezethető forrásirányok anomáliáit a megfigyelőhely geológiai környezetének, valamint éjjel az észlelőállomás fölötti, az ELF hullámokkal kölcsönhatásban álló ionoszférikus határrétegnek a geomágneses tér miatti vezetőképességi anizotropiája idézheti elő [Füllekrug és Sukhorukov, 1999]. A hullámvezető bármelyik határfelületének vezetőképességi anizotropiája a horizontális mágneses tér polarizációs síkjának elfordulását okozza, aminek következtében a levezetett irány hibája elérheti a tapasztalt mértéket. A forrás SRT-ekből levezetett irányának a pontosságáról a III.7., „*A forrás irányának meghatározása*” c. fejezetben esett részletesebben szó.

A fentiek ismeretében a horizontális mágneses tér idősorának előállításánál a mágneses térerősségvektor mérésekből meghatározott irányra vett vetületét (és nem a valódi forrásirányra vett vetületét) vettem figyelembe. Az árammomentum-spektrumok előállításához ugyanakkor az ismert forrás-észlelő távolsághoz tartozó modell térkomponens-spektrumokat használtam. A mérésekből meghatározott és az ismert forrás-észlelő távolság egyezésének mértéke az eredmények megbízhatóságának egy újabb jelzője volt.

2003 és 2009 között több FEOE megfigyelési kampány észleléseihez számoltam forrásvillám töltésmomentum-változásokat. A következőkben a kapott eredményeket ismertetem.

V.1. Az EuroSprite 2003 megfigyelési kampány

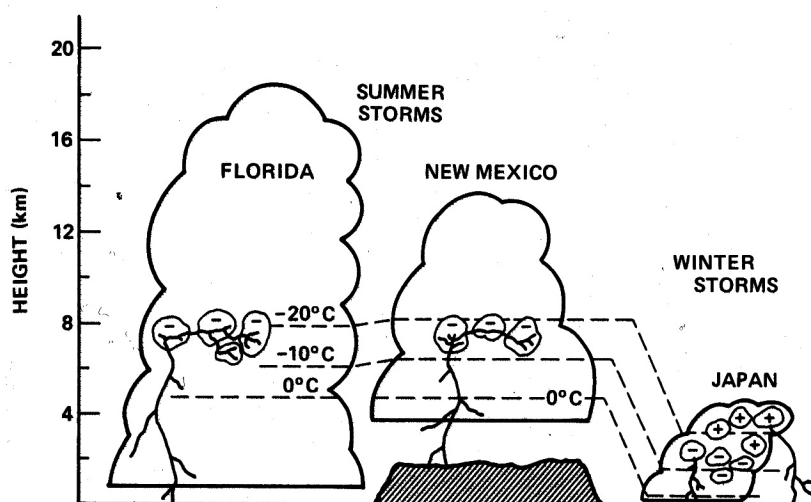
Az EuroSprite 2003 FEOE megfigyelési kampány során 2003 nyarán 101 vörös lidérc eseményt észleltek a Pireneusokban felállított és távvezérelt kamera segítségével Közép- és Nyugat-Franciaországban valamint Dél-Európában. A 101 vörös lidérc esemény közül 76 bizonyult alkalmasnak rá, hogy a forráskisülésének ELF jeleiből töltésmomentum-változást lehessen becsülni. A kapott becslések 300 C·km és 4500 C·km között mozogtak, a leggyakoribb értékek 300-700 C·km között fordultak elő (89. oldal, 33.a ábra) [Neubert et al., 2005]. Az eredmények jó egyezést mutattak azokkal, amelyeket Huang és munkatársai Észak-Amerika fölötti vörös lidérc forrásvillámainál tapasztaltak (89. oldal, 33.e ábra) [Huang et al., 1999], másrészt valamivel alacsonyabbak voltak, mint amit ugyancsak Észak-Amerikában egy másik zivatar által generált vörös lidérc esetében észleltek (89. oldal, 33.d ábra) [Marshall et al., 2005].

V.2. Az EuroSprite 2005 megfigyelési kampány

A 2003-as európai megfigyelési kampány folytatásaként 2005 júniusa és novembere között is történtek felsőlégköri optikai megfigyelések szintén a Pireneusokból. Ezúttal is csak vörös lidérceket sikerült fényképezni, és a kampány a hosszabb megfigyelési időszak ellenére az észlelt események számát illetően kevésbé volt sikeres, mint 2003-ban. Az összesen 64 megfigyelt emisszió közül 59 esetében sikerült a hozzátartozó ELF tranzienszt azonosítani. Ezek közül 9 olyan volt, amelyhez a helyi villámfigyelő-hálózat által rögzített villámok között nem lehetett egyértelműen a forráskisülést kiválasztani. Az 59 SR tranzienszből 43 forrásának a vertikális töltésmomentum-változását tudtam megbecsülni [Arnone et al., 2008]. A kapott eredmények a 2003-as értékekhez hasonlóan a 300-4600 C·km-es tartományba estek, azonban ezúttal az eloszlásnak két csúcsa volt megfigyelhető: egy kiugró esetszám 500 C·km-nél és egy szélesebb csúcs 1200 C·km körül (89. oldal, 33.b ábra). Az 1000 C·km-hez közeli töltésmomentumok számának dominanciája a 2003-as összehasonlítás másik észak-amerikai statisztikájához hasonló (33.d ábra) [Marshall et al., 2005].

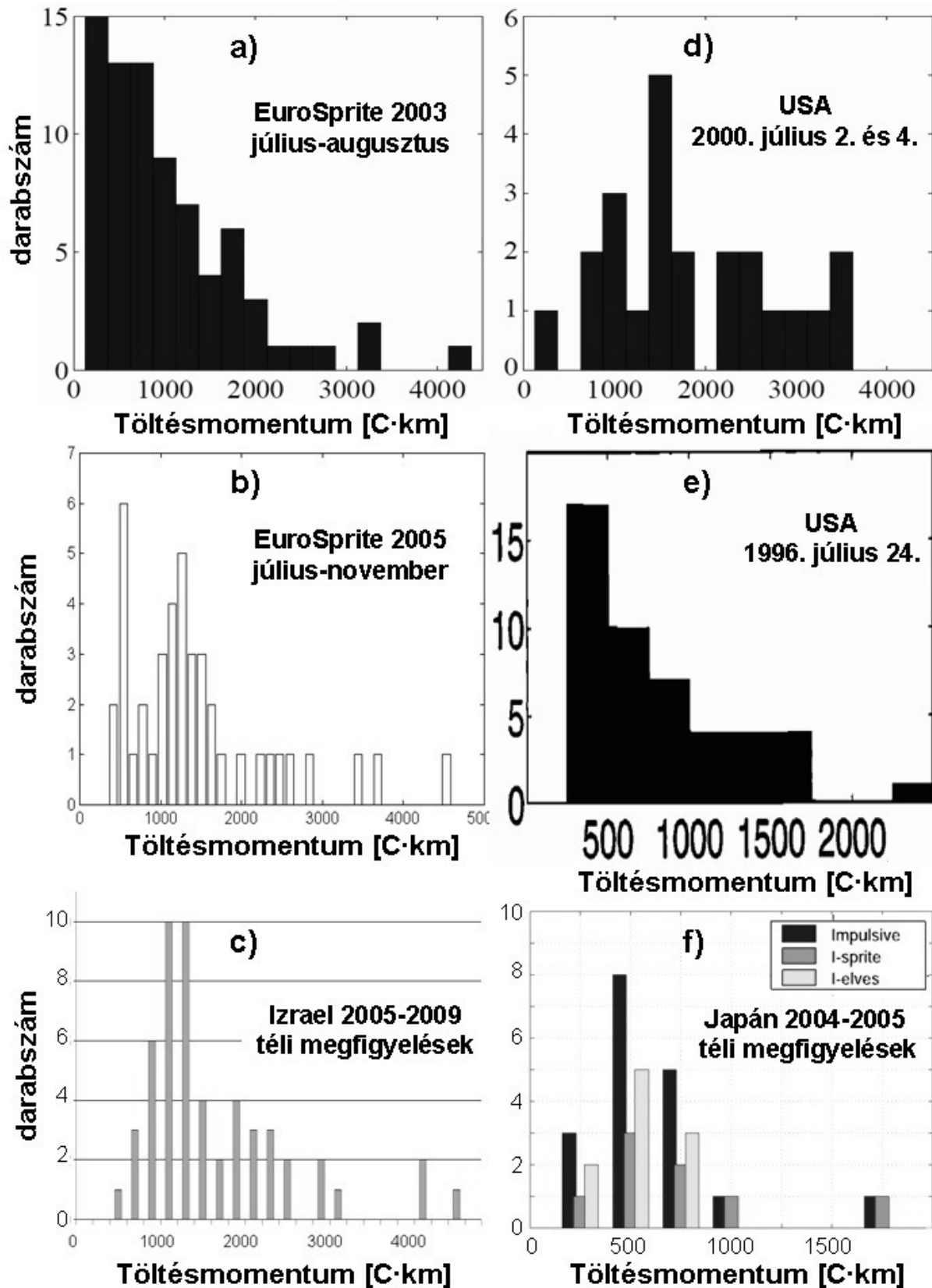
V.3. FEOE megfigyelések kelet-mediterrán téli zivatarok fölött Izraelből 2005 és 2009 között

Felsőlégi elektro-optikai megfigyeléseket 2005 óta folytatnak Izraelből. A mediterrán térségben a zivatarok főleg a késő őszi és téli időszakra jellemzők, amikor a fő zivatarzóna közepes szélességekről délebbre húzódik. A zivatarok kialakulásának mechanizmusa és a zivatarfelhők jellemzői a kelet-mediterrán régióban különböznek a közepes szélességek kontinentális területei fölött megszokottaktól [Suzuki et al., 2006; Williams és Yair, 2006]. A melegebb tengerfelszín fölötti és a szárazföldi hidegebb légtömegek keveredésekor keletkező feláramlás általában alacsonyabb (legfeljebb 8-10 km magas) és vertikálisan kevésbé kiterjedt (5-7 km vastag) zivatarfelhőket eredményez, mint amilyenek a kontinensek belseje fölött a tropopauzáig (kb. 16-18 km a trópusokon, 10-12 km közepes szélességeken [Mohanakumar, 2008, 1.6 fejezet]), esetenként e fölé nyúló képződmények (32. ábra) [Ganot et al., 2007].



32. ábra: Jellemző töltéeloszlás és hőmérsékleti szintek észak-amerikai (Florida) és új-mexikói (New Mexico) nyári, illetve japán téli zivatarfelhőkben. Az ordinátán a magasságot (height) tüntették fel [Rakov és Uman, 2003, Fig. 3.7.].

Az Izraelből észlelt FEOE-k közül 2005 és 2006 telének teljes megfigyelési anyagát feldolgoztam, a 2007-es és a 2008-as megfigyelések közül csak az események egy részének adatai álltak rendelkezésre. Ettől függetlenül az összes feldolgozott emisszióra vonatkozó eredményt itt együtt tárgyalom, mert az első két évben kapott eredmények nem mutattak számottevő különbségeket, ami indokolná az egyes években kapott eredmények külön kezelését. A megfigyelt jelenségek túlnyomó részét vörös lidércek teszik ki, amelyek forrásvillámai a vörös lidércek mellett 2 alkalommal gyűrűlidérc, 5 alkalommal lidércudvar



33. ábra: Különböző kontinensek és régiók fölött megfigyelt vörös lidércek forrásvillámainak töltésmomentum-változásai. A publikált ábrák forrásai: a) és d) [Marshall et al., 2005, Fig. 6.]; e) [Huang et al., 1999, Figure 7.(a)]; f) [Matsudo et al., 2007, Fig. 8.]. Az f) panelen található értékeket impulzív forrásközelítéssel határozták meg. Sötétszürkével a publikációban szereplő vörös lidércek (sprite), világosszürkével a gyűrűlidércek (elves) forrásvillámainak a töltésmomentumai szerepelnek, feketével az összesített eseményszám látható.

megjelenését is okozták. A vizsgált 73 vörös lidérc mindegyikét pozitív polaritású villámkisülés keltette. Ezek közül 67-hez találtam hozzárendelhető ELF tranzienszt is, amelyekből a vertikális töltésmomentumot 54 esetben lehetett becsülni. A töltésmomentumok 370 C·km és 4300 C·km között helyezkedtek el, a leggyakrabban 1000 C·km körüli értékek fordultak elő (33.c ábra, az előző oldalon) [Greenberg et al., 2007; Yair et al., 2009].

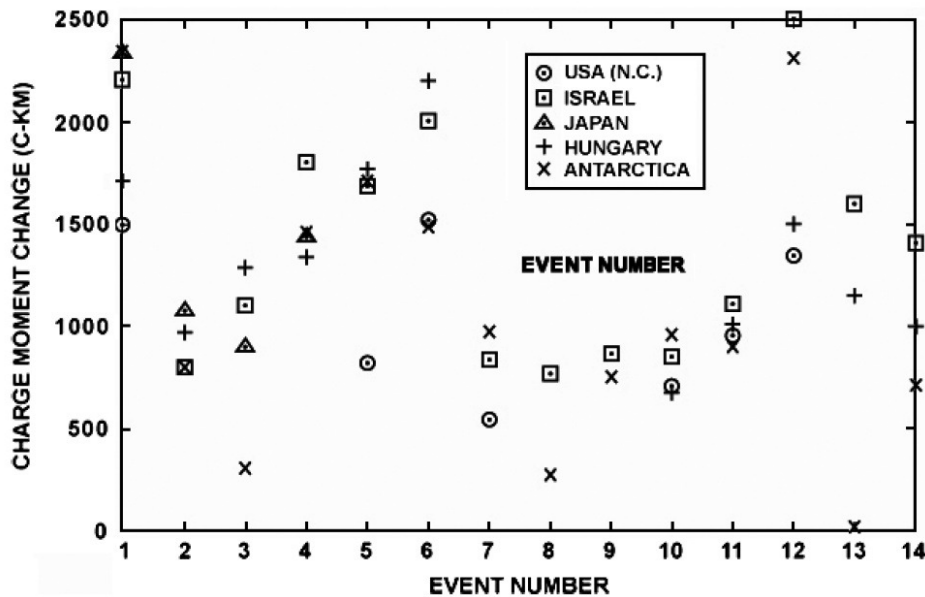
Összesen 12 különálló gyűrűlidérc észlelésből 9 esetében figyeltünk meg ELF tranzienszt is. A 9 gyűrűlidérből egy forrásvilláma negatív polaritású volt, a többi pozitív polaritású. A 9 ELF esemény közül 8-hoz, közte a negatív polaritásúhoz is forrástöltésmomentum-változást határoztam meg. A negatív kisülés töltésmomentum-változása -428 C·km-nek adódott, míg a többi érték 425 C·km és 1385 C·km közé esett, de a vörös lidérceknél leggyakoribb 800-1000 C·km-es sávba ezek közül egyik érték sem került.

2008-2009 telén két különálló lidércudvar észlelés is történt Izraelből. Ezek levezetett forrástöltésmomentum-változásai (1220 C·km és 1300 C·km) a vörös lidérceknél tapasztalt átlagoshoz közeli értékek közé tartoztak.

Az izraeli kollégáknak 2008 áprilisában, illetve májusában néhány kis kék nyalábot is sikerült fényképezni Jordánia fölött, azonban ezekhez nem társult észlelhető ELF tranziens.

V.4. FEOE észlelések Afrika fölött

Annak ellenére, hogy Közép-Afrika a legaktívabb zivatarzóna a Földön [Christian et al., 2003] és ennek megfelelően FEOE-k keletkezésének a valószínűsége a kontinensrész felett magas, megfelelő infrastruktúra hiányában csak 2006-ban került sor felsőlégköri emissziók első, földfelszínről folytatott megfigyelésére [Williams et al., 2010]. A kedvezőtlen időjárási körülmények miatt összesen két éjszaka történt sikeres észlelés a megfigyelési időszak ideje alatt Niamey térségében (Nigéria). Összesen 11, egyöntetűen pozitív polaritású forrásból származó vörös lidércet sikerült lencsevégre kapni, amelyek közül 9 forrásvillámának a jelét Sopron mellett is észleltük. Mind a kilenc esetben meghatároztam a töltésmomentum-változás becsült értékeit, amelyek 660 C·km és 2200 C·km között nagyjából egyenletesen helyezkedtek el, azaz a többségük 1000 C·km fölött volt. Az észlelések között két, vörös lidérc nélküli lidércudvar is akadt, amelyek közül az egyik negatív polaritású forrásból származott. A kettő közül ennek az eseménynek a forrásárammomentum-változását tudtam meghatározni és ez -680 C·km-nek adódott.



34. ábra: Közép-Afrikában 2006. augusztus 30-án és szeptember 21-én megfigyelt optikai emissziók forrásvillámainak különböző ELF mérőállomások adataiból levezetett töltésmomentum-változásai (charge moment change). Az abszcisszán az események sorszámai (event number) szerepelnek. #1,2,3,4,5,6,8,9,12,13,14 vörös lidércet, #7,10 lidércudvart és #11 egy a felvételeken különösen fényes felhővillámot jelöl [Williams et al., 2010, Figure 4.].

A megfigyelt FEOE-k, valamint egy különösen fényes felhővillám forrásainak az extrém alacsonyfrekvenciás sugárzását a Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium mérőrendszere mellett több ELF észlelőhelyen rögzítették. A különböző állomásokon közösen regisztrált események aránya 40-60% volt. Bár az adatok feldolgozására és a töltésmomentum-változás meghatározására különböző eljárást használtak (elemzés az időtartományban [Cummer és Inan, 2000]: Egyesült Államokban; exponenciális árammomentum-közelítés és frekvenciatartományban történő elemzés [Huang et al., 1999]: Izrael, Antarktisz (Syowa állomás), Nagycenk; impulzusforrás-közelítés [Huang et al., 1999]: Japán), a levezetett töltésmomentumok értékei a módszerekben alkalmazott közelítések ellenére elfogadható egyezést mutattak. Az ugyanahhoz a kisüléshez tartozó becsült töltésmomentum-értékek átlagosan kb. 20%-os pontossággal egyeztek meg. Általában a töltésmomentum a különböző állomásokon egyik kisülés után a következőnél következetesen nagyobb, illetve kisebbnek adódott (34. ábra). Ez az elemzés rámutat, hogy a különféle töltésmomentum-meghatározással hasonló eredményeket kapunk. A levezetett töltésmomentum-értékek abszolút pontossága azonban kellő számú és pontosságú direkt mérés hiányában nem határozható meg.

V.5. Lidércudvar észlelések a FORMOSAT-2 műholdról 2004-2007

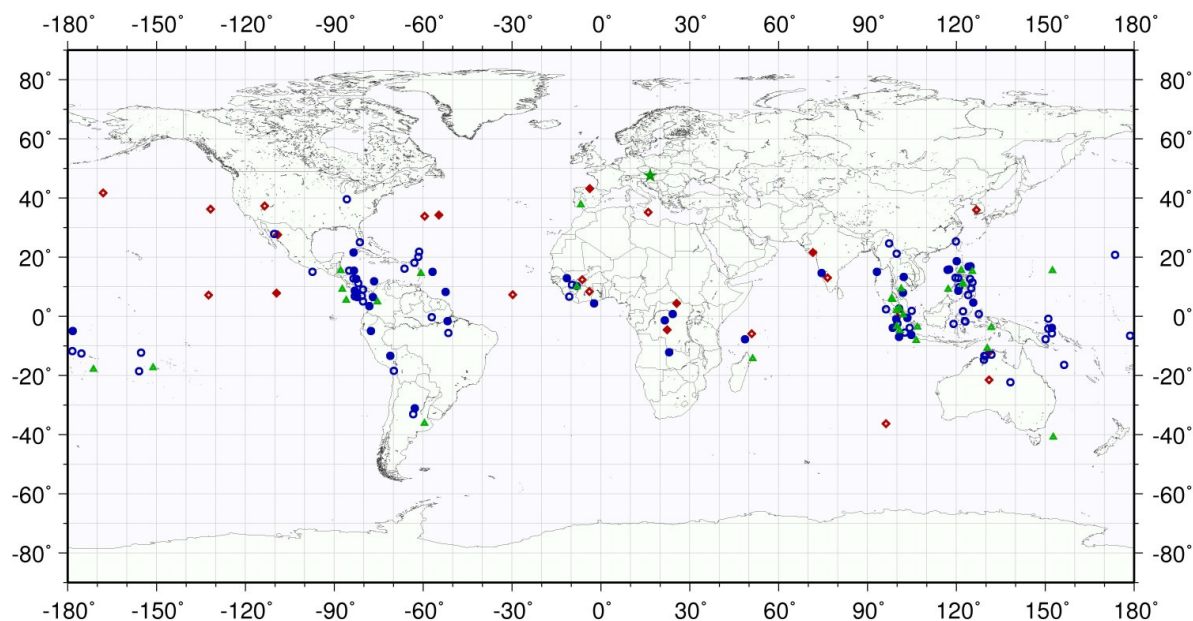
A FORMOSAT-2 műhold ISUAL (Imager for Sprites and Upper Atmospheric Lightning) megfigyelőegysége 2004 és 2008 között összesen közel 10000 különböző FEOE-t (többségében gyűrűlidérceket) regisztrált bolygószerke a 45°-os déli és szintén 45°-os északi szélességi körök között [Hsu et al., 2009]. A megfigyelt emissziók közül a lidércudvaroknak (15. oldal, 4.c ábra) azt a 2004 júliusa és 2007 decembere között észlelt részhalmazát vizsgáltuk közelebbről, amelyben ezek a jelenségek önmagukban, vörös lidércek egyidejű kialakulása nélkül jelentek meg. Az eseményeknek ez a részhalmaza 187 megfigyelést tartalmazott.

A megfigyelési időpontok alapján lidércudvarokat keltő villámkisülésektől eredő ELF tranzienseket kerestem a Széchenyi István Geofizikai Observatórium adatsoraiban. Az esetek többségében viszonylag kis amplitúdójú jeleket tudtam az ISUAL eseményekhez rendelni. A forráskisülés polaritását 121 esetben lehetett kellő biztonsággal megállapítani. A fennmaradó észlelések közül 31 időpontja körül semmilyen tranziens jelenség nem volt megfigyelhető a térkomponensek idősoraiban, míg 35 esetben kis amplitúdójú ELF zavarok fordultak elő, amelyekből azonban további információt nem sikerült kinyerni. Az eredmények szerint (98 negatív és 23 pozitív polaritású forrás) negatív polaritású villámok keltették a vizsgált emissziók nagyobb részét.

A különböző polaritású forrásokat előfordulási hely szerint három csoportba soroltam: vízfelület fölötti, szárazföld fölötti és partvidék fölötti eseményeket különböztettem meg. Az utóbbi csoport bevezetését indokolja, hogy pusztán a műholdas megfigyelések alapján az emissziók tényleges helyét csak véges pontossággal lehet meghatározni. A besorolás eredményei szerint a negatív forrásvillámú lidércudvarok inkább vízfelület fölött és különösen a partvidékek mentén gyakoriak, míg a pozitív események éppen a partvidékek fölött ritkábbak (35. ábra, a következő oldalon).

	Szárazföld fölött	Vízfelület fölött	Partvidék fölött
Pozitív keltővillám	10	10	3
Negatív keltővillám	23	34	41

1. Táblázat: A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által 2004 júliusa és 2007 decembere között észlelt lidércudvarok kiértékelhető részhalmazában az események megoszlása polaritás és topográfia szerint.

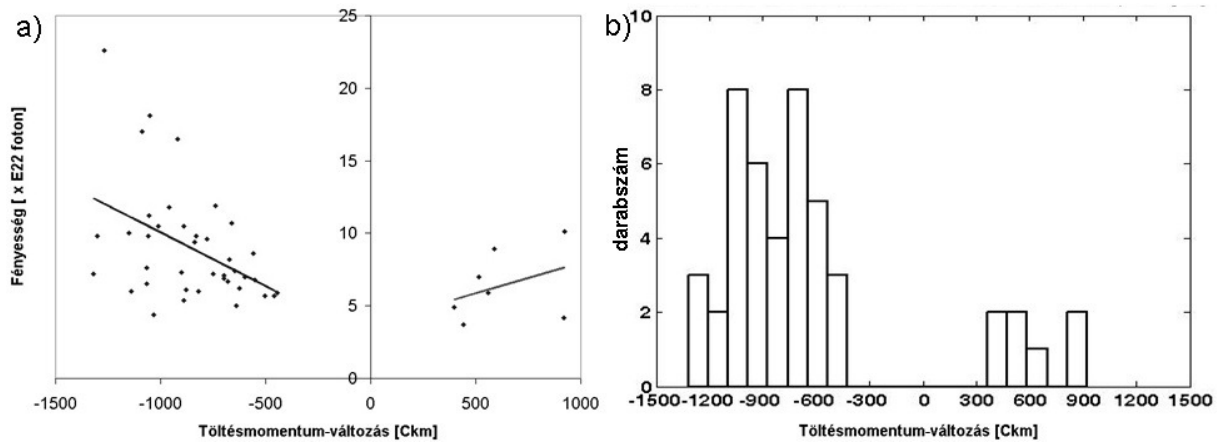


35. ábra: A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által 2004 júliusa és 2007 decembere között észlelt lidércudvarok részhalmazai. Kék körökkel a negatív polaritású, piros rombuszokkal a pozitív polaritású eseményeket jelöltem. A kitöltött alakzatokhoz tartozó eseményeknél a töltésmomentum meghatározása is lehetséges volt. A zöld háromszögek olyan lidércudvarok helyét mutatják, amelyekhez semmilyen ELF tranzienst nem volt megfigyelhető NCK állomáson, amelynek helyén zöld csillag látható.

A 187 önálló lidércudvar közül 127 abszolút fényességét lehetett megállapítani. A 127 eseményből 46 olyan akadt (7 pozitív és 39 negatív), amelyeknek a forrástöltésmomentum-változását a hozzátartozó SRT-ből becsülni tudtam. Amíg az európai és az afrikai földfelszíni FEOE észleléseknél a forráskisülések és a SRT észlelés is mindig ugyanolyan (éjszakai) körülmények között ment végbe, a levezetett töltésmomentumoknál nem alkalmaztam korrekciót. A műholdról történt globális észlelés esetében azonban szükséges volt az eredmények helyesbítése, hogy az adathalmaz töltésmomentumai egymással összemérhetőek legyenek. Az adatfeldolgozásban alkalmazott impulzusválasz modellekben (III.8., „*A forrás távolságának meghatározása*” c. fejezet) alkalmazott ionoszféra-paraméterek a nappali ionoszférikus vezetőképességi profilon alapulnak [Jones, 1967; Ishaq és Jones, 1977], ezért első közelítésben az éjszakai észlelésből származó töltésmomentum-változásokat 20%-kal megnöveltem a IV.3., „*A különböző mérőállomások adataiból meghatározott forrásárammomentum-spektrumok összehasonlítása*” c. fejezetben ismertetett eredmények alapján.

A pozitív polaritású emissziók forrástöltésmomentum-változásai így 400 C·km és 920 C·km közé estek és eloszlásuk nagyjából egyenletes volt. A negatív polaritású lidércudvarok esetében -440 C·km és -1300 C·km közötti értékek fordultak elő, gyakrabban 700 C·km és 900-1000 C·km környékén (36.b ábra, a következő oldalon).

A lidércudvarok fényességét a forrásuk töltésmomentum-változásának függvényében ábrázolva látható, hogy a két mennyiség között mind negatív, mind pozitív polaritás esetén gyenge pozitív korreláció figyelhető meg (36.a ábra).



36. ábra: a) A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által 2004 júliusa és 2007 decembere között észlelt lidércudvarok kiértékelhető részalmazában a fényesség és a forráskisülés töltésmomentum-változásának összefüggése. b) az a) ábrán látható töltésmomentum-értékek eloszlása.

V.6. Következtetések

Vörös lidérceket keltő villámkisülések töltésmomentum-változásait határoztam meg Nyugat-Délnyugat Európában, a keleti mediterrán régióban Izrael környékén és néhány esetben Afrika fölött. A három területen tapasztalt, vörös lidércek keletkezéséhez kapcsolható vertikális töltésmomentum-változások által lefedett tartomány, valamint az értékek eloszlása is jó egyezést mutatnak az észak-amerikai kontinens fölött találtakkal (89. oldal, 33. ábra) [Marshall et al., 2005]. Ez az európai és az afrikai eseményeknél kevésbé váratlan tapasztalat, mint a keleti mediterrán zónát illetően, ahol a zivatarok kialakulása, szerkezete és dinamikája eltér a kontinentális területek fölött megszokottól, például az amerikai síkságok fölötti nagy kiterjedésű, konvektív zivatarcella-rendszerektől (88. oldal, 32. ábra) [Suzuki et al., 2006; Williams és Yair, 2006]. A hasonló troposzférikus tulajdonságokkal rendelkező japán-tengeri zivatarok fölött megjelenő vörös lidércek esetében a források töltésmomentumváltozás-eloszlása az európaihoz hasonló, az értéktartomány azonban a kisebb töltésmomentumok felé eltolódott és az eloszlás maximuma 500 C·km körüli [Hobara et al., 2001; Matsudo et al., 2007], míg Európában ugyanez 1000 C·km (89. oldal, 33. ábra).

Az európai mediterrán és a japán-tengeri vörös lidérc forrásvillámok átlagos tulajdonságai közötti eltérés kevésbé meglepő, ha figyelembe vesszük, hogy pl. Dél-Amerikában Brazília fölötti kontinentális, egyetlen éjszaka alatt több mint 400 FEOE-t

produkáló zivatar vörös lidérc és lidércudvar emisszióinak forrásvillámai a 100-800 C·km-es töltésmomentum változást mutattak és az átlagos érték 255 C·km körüli volt [Sao-Sabbas, 2008]. Cummer és Lyons ugyanakkor észak-amerikai zivatarok esetében is eltérő minimális kritikus töltésmomentum értékeket (600 C·km, illetve 350 C·km) találtak [Cummer és Lyons, 2005], valamint hasonlóan nem egybevágóak Huang és Hu eredményei sem a leggyakoribb FEOE forrásvillám töltésmomentumot illetően szintén észak-amerikai, nyári megfigyelésekben (500 C·km, illetve 800 C·km) [Huang et al., 1999; Hu et al., 2002]. Mindez arra utal, hogy a FEOE-kat életre hívó zivatarok általános struktúrájának jelentősége az emissziók keltésének szempontjából kisebb, mint a zivatar aktuális dinamikája és a zivatarok tulajdonságai mellett egyéb helyi állandó vagy változó tényezők hatásából eredő faktorok (pl. aeroszol koncentráció [Lyons et al., 1998]) szerepe meghatározóbb lehet. A megfigyeléseinkből ezért azt a következtetést lehet levonni, hogy Nyugat- és Délnyugat-Európában, a keleti mediterrán régióban Izrael környékén valamint Észak-Amerikában több év átlagát tekintve nincsen számottevő különbség a vörös lidérceket keltő villámkisülések vertikális töltésmomentum-értékeinek eloszlásában.

A lidércudvarok vonatkozásában Frey és munkatársai korábban szintén a FORMOSAT-2 észleléseinek Észak-Amerika fölé eső részét vizsgálták a helyi villámfigyelő hálózat (NLDN) adataival együtt [Frey et al., 2007]. Megállapították, hogy a régió fölött megfigyelt lidércudvarokat negatív polaritású forráskisülések keltették, és a lidércudvarok többsége vízfelület, illetve a kontinentális partvonal fölött jött létre. Az ELF sávban folytatott megfigyeléseink alapján kijelenthetjük, hogy Frey és munkatársainak megfigyelései a források polaritásbeli aszimmetriáját illetően globálisan irányadóak, azaz a lidércudvarok többségét negatív polaritású forrásvillámok keltik és a negatív forrásvillámú lidércudvarok inkább vízfelület fölött és különösen a partvidékek mentén gyakoriak. Az eredmények alapján viszont a pozitív polaritású események előfordulása szabad vízfelület és szárazfölkök fölött egyformán gyakori, miközben éppen a partvidékek fölött ezek az emissziók ritkábbak. A lidércudvarokat keltő forrásvillámok között a negatív polaritásúak globális dominanciájára utal, hogy a FORMOSAT-2-ről észlelt összes lidércudvar eloszlását Hsu és munkatársai szárazföld / partvidék / tenger = 21% / 40% / 39% -nak találták [Hsu et al., 2009], ami az általunk vizsgált mintában a negatív polaritású forrásvillámok eloszlásához áll közelebb.

Barrington-Leigh és kollégái modellezték a lidércudvarok kialakulását [Barrington-Leigh et al., 2001] és azt találták, hogy az emisszió fénysége a kialakulást kísérő kvázi-stacionárius elektromos tér erősségének a függvénye. A forráskisülés vertikális

töltésmomentum-változása meghatározza a zivatarfelhő és az ionoszféra között kialakuló kvázi-stacionárius elektromos tér amplitúdóját [Pasko, 2006]. Tapasztalataink szerint a lidércudvarok fényessége és a forráskisülés töltésmomentuma között csak gyenge korreláció áll fent, ami arra utal, a jelenség fényességének mértékét nem kizárólag a forráskisülés töltésmomentum-változásával összefüggő hatások befolyásolják. A lidércudvarok fényességét meghatározó további faktorok azonosítása további vizsgálatokat igényel.

A lidércudvarok megjelenését kiváltó forráskisülések töltésmomentum-változásainak nagyságrendje a rendelkezésre álló esetek alapján polaritástól függetlenül számottevő és a vörös lidérceknél tapasztalt nagyságrendbe esik. Ez alapján a lidércudvarok lehetnek nagy valószínűséggel azok a negatív polaritású, nagyobb forrástöltésmomentum-változásokhoz tartozó magaslégköri kisüléstípusok, amelyek létezését a Wilson-diagram (11. oldal, 1. ábra) sugallja. Wilson modelljében megfelelő töltésmomentum-változás esetén polaritástól függetlenül létrejöhet kisülés a felsőlégkörben, ám a modellnek megfelelő vörös lidércek forrásvillámai túlnyomórészt pozitív polaritásúak. A vörös lidércek és a lidércudvarok közötti fenomenológiai különbségek és a forráskisüléseik közötti polaritásbeli aszimmetria egyaránt a pozitív és a negatív polaritású kisülések kialakulásának, illetve végbemenetelének különbségeiből [Rakov és Uman, 2003, 4. és 5. fejezet; Uman, 1987, 7. és 11. fejezet] fakadhatnak. A lidércudvarok megfigyelését nehezíti átlagosan kisebb luminozitásuk és rövid élettartamuk, ami miatt a vörös lidérc észlelésekhez még alkalmas hagyományos eszközökkel az észlelésük valószínűsége kisebb. Ez vezethetett a megfigyelt forráspolaritások arányán alapuló látszólagos ellentmondáshoz [Williams et al., 2007; Williams et al., 2009].

VI. Felsőléggörri optikai megfigyelőrendszer felállítása Sopronban

VI.1. Motiváció

A felsőlégkörri elektro-optikai emissziók megfigyelése több módon lehetséges. Műholdakról gyakorlatilag a teljes légkör megfigyelhető, azonban a műhold pályájától függően egy időben mindig csak egy kisebb térrészben történik észlelés [Hsu et al., 2009]. A repülőgépes [Sentman et al., 1995; Wescott et al., 1995], illetve ballonos [Bering et al., 2004] kampányok előnye, hogy az emissziókat közeliről lehet tanulmányozni, azonban ezek a megoldások

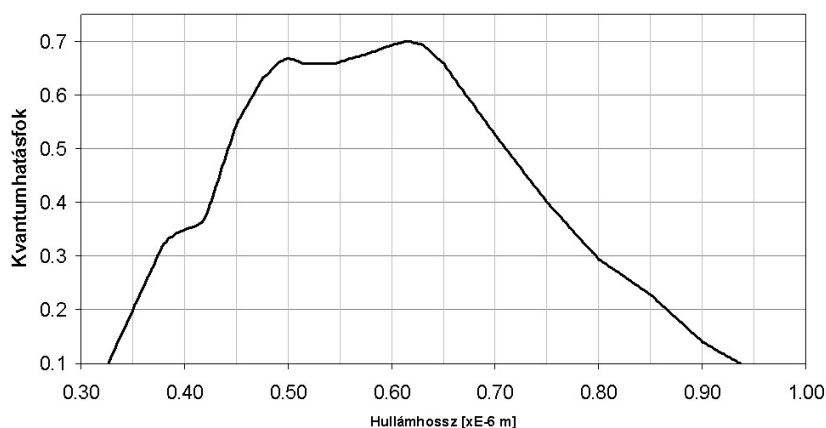
nagyon költségesek. A földfelszínről történő észlelések ugyanakkor igen költséghatékonyak és segítségével a megfigyelőhely többszáz km-es körzetében hosszabb távon figyelemmel lehet kísérni a FEOE-k előfordulását. Kiegészítő információkat szolgáltathatnak más módszerekkel történő direkt megfigyelésekhez és helyi villámfigyelő hálózatokkal együttműködve értékes kiindulási alapot adnak a FEOE-k tulajdonságainak a megismeréséhez, modellezéséhez és a modellek eredményeinek az ellenőrzéséhez. A földfelszínről folytatott megfigyelés hátránya, hogy korlátozhatják a helyi időjárási viszonyok, pl. közeli felhők, a látási viszonyokat befolyásoló por, lakott területen a fényszennyezés, illetve a látótávolságot csökkentő tereptárgyak.

A FEOE-k felfedezése szintén földfelszíni észlelés során történt Észak-Amerikában [Franz et al., 1990], ami után előbb-utóbb a többi kontinensen is sor került ezen jelenségek földfelszínről történő megfigyelésére is [Thomas et al., 2007 (Dél Amerika); Su et al., 2002 (Kelet-Ázsia); Fukunishi et al., 1996 (Japán); Hardman et al., 2000 (Ausztrália); Williams et al., 2010 (Afrika)]. Európában az első szervezett FEOE megfigyelési kampányt Neubert és munkatársai folytatták a kontinens nyugati-dél nyugati részén [Neubert et al., 2001]. A keleti mediterrán régióban 2005-től végeznek észleléseket Izraelből [Ganot et al., 2007]. Közép-Európában azonban nem történtek földfelszíni FEOE megfigyelések 2007 előtt annak ellenére, hogy Füllekrug és Riesing korábban a vörös lidércek keltésére alkalmas kisülések gyakori előfordulását mutatta ki ebben a régióban [Füllekrug és Riesing, 1998]. 2007-ben az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) „Geoelektromosság és változó Föld” c. tudományos iskolai projektjének keretében [Ádám et al., 2009] összeállítottunk egy megfigyelőrendszert, amellyel optikai megfigyeléseket folytathattunk Közép-Európában [Bór et al., 2009].

VI.2. Eszközpark

A FEOE-k sikeres megfigyeléséhez a korábbi kampányokban [Su et al., 2002; Ganot et al., 2007] jó eredménnyel szereplő Watec 902 sorozat újabb tagját, a WATEC 902H2 Ultimate analóg CCD kamera CCIR szabványú (monokróm, 25 váltott soros képkocka másodpercenként) változatát választottuk. Ezt a kamerát ½”-os Sony EXview HAD CCD chippel szállítják, amely igen érzékeny (a legkisebb szükséges megvilágítás 0.0001 lux F1.4-es lencsével) és amelynek a spektrális érzékenységi tartománya magában foglalja a felsőlégköri emissziók sugárzásának döntő hányadát kb. 350 nm és kb. 900 nm között (37.

ábra). A kamera jól konfigurálható. Háttérfény kompenzációját 4 különböző konfigurációban, gamma erősítést 3 fokozatban (0.3, 0.45, 1.0), a lineáris erősítést két automata fokozat mellett (alacsony és magas) analóg módon 5dB és 60 dB között lehet állítani és támogatja a VIDEO és DC (Direct Current) automata írisszel felszerelt objektíveket, ráadásul az írisz vezérlésének az érzékenysége állítható.



37. ábra

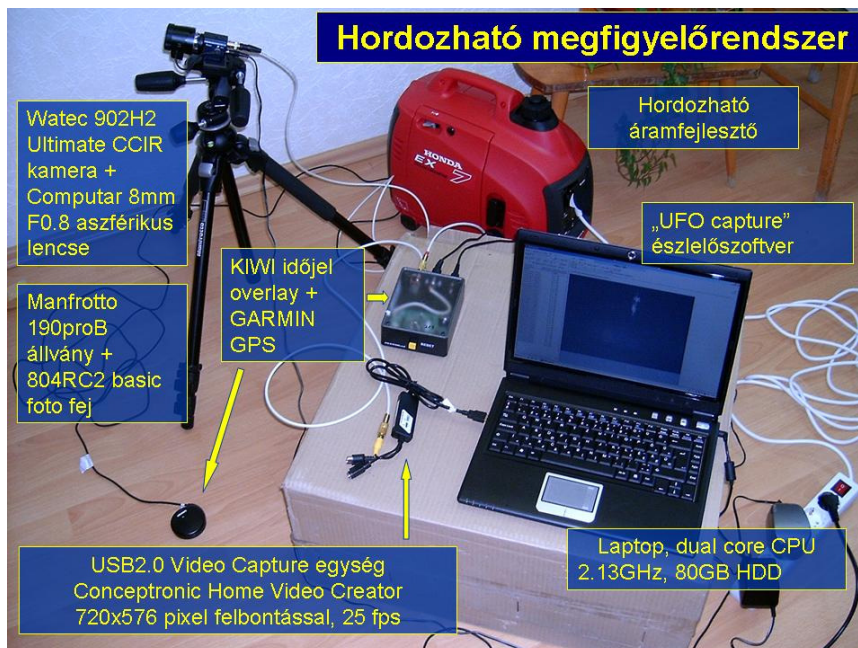
Watec 902H2 Ultimate kamera CCD chipjének kvantumhatásfok görbéje. A kvantumhatásfok megmutatja, hogy az észlelőelemre eső fotonok mekkora hányadát detektálja az eszköz.

A megfigyelésekhez választott objektív nagy fénygyűjtőképességű (F0.8), 8 mm fókustávolságú, aszférikus, DC auto-íriszes COMPUTAR modell (HG0808FCS-L), amelynek effektív látószöge horizontálisan 42°, vertikálisan 31°. Ez az objektív jó kompromisszumnak bizonyult, amennyiben viszonylag széles látószöge mellett a kamera CCD-jének képfelbontásával a céltárgyak még elég sok részletét képes visszaadni. A DC auto-írisz funkció alkalmazása csak biztonsági elemként, a kamera CCD-jének erős fénytől való védelme érdekében szolgált.

Az analóg kamera képének digitalizálásához a Conceptronic Home Video Creator (CHVIDEOCR) USB 2.0 csatlakozású eszközt alkalmaztuk, amely a CCIR szabványnak megfelelő legmagasabb, 720×576 képelem (pixel) felbontású videofelvételt is folyamatosan, információvesztés nélkül állítja elő. A videofelvételek valós idejű elemzéséhez és az észlelések tárolásához nagy számítási teljesítményű laptopra volt szükség (T7400 core 2 duo processzor, 100 MB háttértár, 512 MB DDR2 667MHz RAM).

A felvételek észlelési idejének pontos megállapításához a PFD Systems KIWI OSD 2.0 időjel-megjelenítő eszközt választottuk. A berendezés saját GPS antennával rendelkezik, és a videofelvétel minden képkockájára ezredmásodperces pontossággal rábélyegzi a képkocka expozíciós idejének kezdetét és végét.

Az események észleléshez a japán fejlesztésű „UFO Capture” szoftvert alkalmaztuk, amely a kamera által szolgáltatott képet valós időben elemezte és csak akkor mentett el egy meghatározott hosszúságú felvételt, amikor a kép tulajdonságai a beállított feltételek szerint megváltoztak.



38. ábra: A soproni hordozható felsőlégköri optikai megfigyelőrendszer részei.

Eredeti szándékunknak megfelelően ez az összeállítás könnyen mozgatható és egy állvánnyal (Manfrotto 190ProB állvány és 804RC2 Basic fotófej), valamint egy könnyű áramfejlesztő berendezéssel (Honda EX7) bárhová, infrastrukturális követelmények nélkül telepíthető (38. ábra).

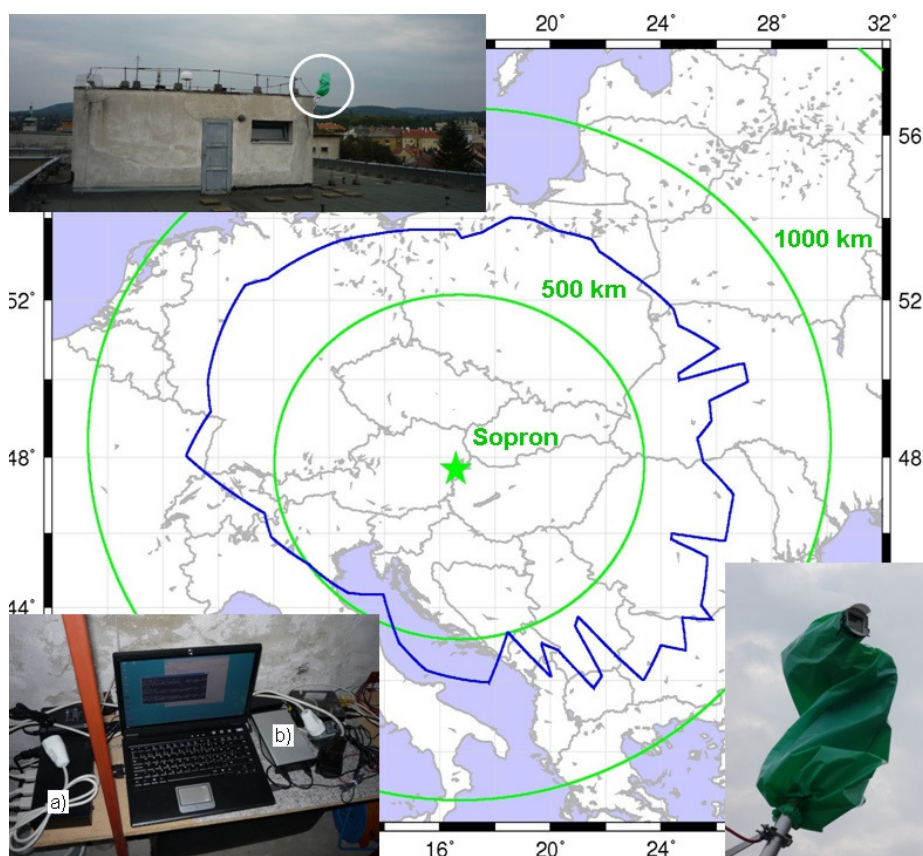
Az első megfigyelési időszak (2007 nyara) utáni tapasztalatok azt mutatták, hogy a soproni kutatóintézetünk tetejéről is megfelelő kilátás nyílik a Közép-Európa fölötti térrészre és a városi környezet ellenére kiváló észleléseket lehet folytatni egy hozzávetőlegesen 500-700 km sugarú körön belül. Ezért 2008-ban úgy határoztunk, hogy rögzítjük a kamera helyét intézetünk tetején és továbbfejlesztettük az észlelőrendszert, hogy interneten keresztül távolról is irányítható legyen.

A kamerát SkyWatcher EQ-3 csillagászati távcsőmozgató mechanika SynScan GoTo motorizált változatának segítségével irányítottuk. A mechanika irányítása számítógépen keresztül alapfunkció, azonban a létező kezelőprogramokat csillagászati alkalmazásra fejlesztették, amelyek ekvatoriális koordináta-rendszerben értelmezett elmozdulásokat értelmeznek. A FEOE megfigyelésekhez szükséges azimut és magasság értékek szerinti

navigációhoz és a mozgatóállvány távoli inicializálásához C++ környezetben saját kezelőprogramot fejlesztettem.

A biztonságos használat további követelménye volt, hogy a megfigyelőrendszer kritikus részeit (kamera, időjel-megjelenítő) az egyes észlelések végén, illetve legkésőbb hajnalban áramtalanítani, szükség esetén újraindítani lehessen. Erre a célra az IP Power 9258S internetes áramkapcsolót alkalmaztuk, amely különálló egységként üzemel és beépített web-szervere segítségével függetlenül vezérelhető.

A kamerát az esőtől és egyéb szennyeződésektől védendő időjárásálló házban helyeztük el és a közelében, zárt, védett helyre telepített számítógépen futó program segítségével mozgatjuk. Az észlelőszoftvert (UFO Capture) is ezen a számítógépen futtatjuk és az észlelések rögzítése is ott történik (39. ábra). A számítógéphez történő távoli hozzáféréshez a LogMeIn díjmentes szolgáltatását vesszük igénybe, amely internetes tűzfal mögött elhelyezkedő irányító és/vagy irányított számítógép, illetve kisebb internetes sávszélesség esetén is kielégítő sebességű adatátvitelt és megbízható kontrollt biztosít.



39. ábra: A soproni rögzített felsőlégköri optikai megfigyelőrendszer észlelési tartománya. A folytonos kék vonal által határolt terület fölött az 50-90 km-es magasságtartomány teljes egészében belátható. **Balra fent** fehér körrel jelölve a kamera helyzete látható a Geodéziai és Geofizikai kutatóintézet tetején a liftházon rögzítve. **Jobbra lent** az időjárás viszonyosságai ellen burkolt kamera és mozgatóegység közeli képe található. **Balra lent** a liftházban elhelyezett további eszközök. Az előző oldalon, a 38. ábrán látható összeállításhoz képest itt nincs szükség az állványra és az áramfejlesztőre, viszont új részegység az interneten keresztül vezérelhető áramkapcsoló (a) és egy külső, nagy kapacitású (500GB) háttértár (b).

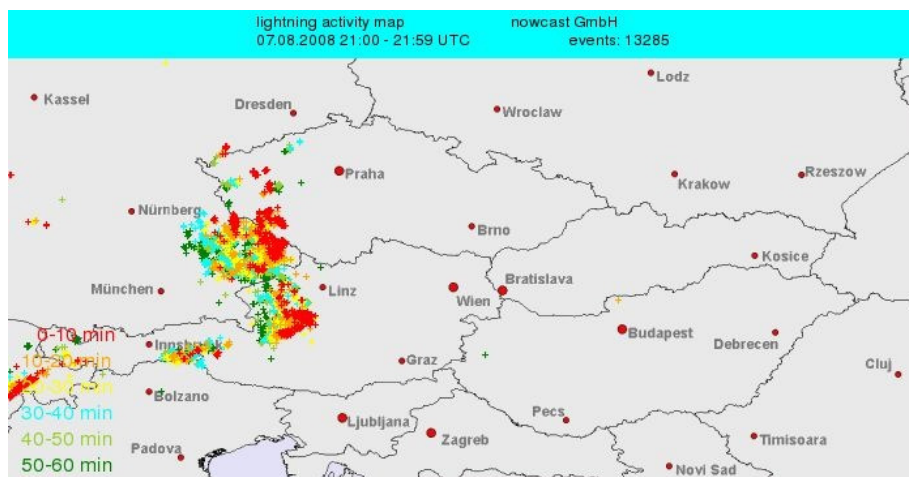
A távoli hozzáférésnek köszönhetően a megfigyelőrendszer kezelése nagymértékben leegyszerűsödött és az éves megfigyelési időszakot is meg tudtuk hosszabbítani.

VI.3. A megfigyelés módszere és az eszközök beállításai

A FEOE-k megjelenése aktív zivatarfelhőkhöz kötődik, ezért hatékony megfigyelések végzéséhez ismerni kell az aktív zivatargócok helyzetét a megfigyelési tartományon belül. Erre több lehetőség is kínálkozik. A zivatarcellák aktivitása a bennük zajló töltésszétválasztó folyamatok hatékonyságának a függvénye. A zivatarcella belsejében a töltésszétválasztó folyamatok hatékonyságának szempontjából kedvezőbb intenzív feláramlás [Williams és Yair, 2006] magasabb felhőkupolát alakít ki, amelynek a hőmérséklete nagy magasságokban alacsony. A felhőtető hőmérsékletét jelző infravörös műholdas felvételeken ezek a tartományok általában fehér színnel jelennek meg. Közép-Európát is lefedő műholdas infravörös képek több helyen is elérhetők az interneten (pl. <http://hu.allmetsat.com>, http://wind.met.fu-berlin.de/wind/satellit/meteosat_loop.php). A felvételek sorozatán a kifényesedő foltok közelében várható intenzívebb zivatartevékenység.

Természetesen a zivatarcellák aktivitásának közvetlen indikátorai a villámkisülések. A villámok helyét és néhány tulajdonságát villámfigyelő hálózatok meghatározhatják a kisülések szélessávú rádiósugárzását különböző frekvenciatartományokban észlelve [Rakov és Uman, 2003, 17. fejezet]. Közép-Európa területén több ilyen hálózat működik párhuzamosan. A „<http://www.blitzortung.org>” egy amatőr megfigyelőkből álló nonprofit szerveződés, amelynek 20 percenként frissülő villámtérképei az interneten szabadon hozzáférhetők. Az EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection, <http://www.euclid.org>) több ország nemzeti villámfigyelő hálózatát integráló szolgáltatói szerveződés [Schulz et al., 2005]. A LINET (<http://www.nowcast.de>) egy újabb, a Münchener Egyetem Fizika Tanszékén kidolgozott módszer szerint működő európai villámészlelő hálózat [Betz et al., 2009], amelynek az előző hálózatokhoz viszonyított előnyei az egyenletesebb területi lefedettség, homogén eszközpark, folyamatos, megbízható és részletes információszolgáltatás. Az aktív közép-európai zivatarok helyének meghatározására és követésére mi a LINET által a rendelkezésünkre bocsátott villámtérképet használtuk, amely 10 percenként rendszeresen frissítve az aktuális állapotot mutatta (40. ábra, a következő oldalon). A LINET a VLF-LF (Very Low Frequency, 3-30kHz és Low Frequency, 30-

300kHz) tartományban (1-200 kHz) regisztrálja a villámok rádiósugárzásának a horizontális mágneses komponensét és a különböző helyen lévő antennákon a jelek észlelésének időkülönbségéből határozza meg a kisülés helyét. A földrajzi koordinátákon kívül a szolgáltatott adatok között a kisülés csúcsáramának becslése is szerepel, valamint a feldolgozórendszerük megkülönbözteti a felhő-föld és a felhővillámokat, utóbbi esetén a kisülés magasságát is megbecsüli.



40. ábra

Egy LINET által szolgáltatott villámtevékenység térkép (lightning activity map). A példa a 2007-2009 közötti időszakban jellemző formátumot mutat.

Amennyiben több aktív zivatarcella vagy cellarendszer is a megfigyelési tartomány határain belül helyezkedett el és ezek nem fértek bele az optikánk látómezejébe, a villámtevékenység térképét és a műholdas infravörös felvételeket összehasonlítva azt a zivartargócot figyeltük meg, amelyben gyakoribbak voltak a villámkisülések, a zivatarfelhő kiterjedtebb és magasabb volt, ami intenzívebb és hatékony töltésszétválasztási folyamatok működésére utalt. Ilyen esetben a felsőlégköri emissziók keletkezésének a valószínűsége nagyobb [Hu et al., 2002; Pasko, 2006]. Hasonlóan előnyös tulajdonságú zivartargócok esetén a közelebbit választottuk.

A megfigyelendő cella kiválasztása után a kamerát úgy pozícionáltuk, hogy a FEOE-k által leggyakrabban elfoglalt 50-90 km-es magasságtartomány a zivatarcella távolságában a látómező közepére kerüljön. Erre azért volt célszerű külön figyelmet fordítani, mert a kép teljes területét az objektív aszféríkussága ellenére nem lehetett egyidejűleg fókuszálni. Ha a látómező közepét a csillagok, illetve távoli tereptárgyak segítségével a végtelenhez fókuszáltuk, a kép szélei defókuszáltak maradtak. A defókuszáltság mértéke nem volt jelentős, de a kép részletei részben már összemosódtak. A jelenséget azzal magyarázhatjuk, hogy az

objektív extrém fénygyűjtő képességét a gyártók csak kevesebb korrekciós lencsetag alkalmazásával tudták elérni, ami az eredeti, biztonsági megfigyeléseket célzó felhasználás során nem jelent hátrányt, esetünkben azonban zavaró lehetett.

A mobil rendszerrel történt megfigyeléseknél a kamera gamma erősítését 0.45-re állítottuk, míg a lineáris erősítést úgy szabályoztuk, hogy a kép zajossága (ami a kamera hőmérsékletének, valamint a láthatósági viszonyoknak, a légköri aeroszol részecskéken szóródó városi fényeknek a függvénye) minimális legyen. A DC autoírisz érzékenységét a legkisebbre csökkentettük, hogy éjszaka biztosan mindig a lehető legtöbb fény jusson a CCD-re. Rögzített megfigyelések esetén a kamera felszerelését megelőzően egy, a korábbi tapasztalatok alapján optimálisnak talált beállítást alkalmaztam, aminek utólagos korrekciójára szerencsére nem volt szükség. Az automatikus háttérfény-kompenzációt minden esetben kikapcsoltuk. Ezekkel a beállításokkal a megfigyelni remélt események az emberi szem számára jól láthatóan jelennek meg a felvételeken.

Az UFO Capture program a video adatfolyamban az egymást követő képkockákat hasonlítja össze és akkor menti el a felvétel egy időszelétét, ha legalább egy meghatározott számú pixel fényessége meghaladja a statikusnak feltételezett kép átlagos fényességingadozásának egy adott konstansszorosát. A változékony részek kitilthatók a figyelt képterületből egy statikus maszk alkalmazásával, ezenkívül a program egy inicializációs időszak alatt felméri a szcintilláló, de máskülönben statikus objektumokat (pl. csillagok) és automatikusan figyelmen kívül hagyja őket. Ugyancsak konfigurálni lehet lassan mozgó objektumok (pl. repülők) felismerését és az észlelésből való kizárását. Az alkalmazott beállítások szerint egy regisztrálandó esemény akkor következett be, ha legalább 15 pixel fényessége a statikus képrészek átlagos fényességingadozásának a mértékénél 10 %-kal jobban megnövekedett. Alternatívaként eseménynek észlelte a program azt is, ha csak 5 kép pixel fényességváltozása haladta meg a fenti határt, viszont ezeknek a pixeleknél a fényessége legalább két képkockáig fennmaradt. Ez a beállítás lehetővé teszi a képen kisebb kiterjedésű jelenségek észlelését, viszont megakadályozza, hogy az optikába becsapódó és csupán pár pixelt kifényesítő kozmikus részecskék áleseményeket generáljanak.

Minden esemény észlelésekor a program az alkalmazott beállítások szerint az észlelést megelőző 10, és az azt követő 25 képkockát mentette el, amennyiben ez idő alatt nem történt újabb esemény. A definiált időszeleten belül észlelt újabb esemény esetén a rögzítés folytatódott, így elvileg a megfigyelésnek csak annyi holtideje volt, amíg a befejeződött esemény képsorát a program a háttértárban lezárta. Valamennyi rögzített eseménnyel együtt a program tárolta az aktuális észlelési maszkot, a szcintilláló objektumok helyzetét, a rögzítést

kiváltó pixelek helyzetét, valamint a programba előzetesen beírt profiladatokat (pl. a megfigyelőhely koordinátái, tengerszint feletti magassága, az optika adatai, a megfigyelő azonosítója, a megfigyelés rendszer ideje, stb.). Ezek a megfigyelések feldolgozásánál bizonyultak hasznos információnak.

VII. Közép-európai FEOE-k néhány tulajdonsága soproni észlelések alapján

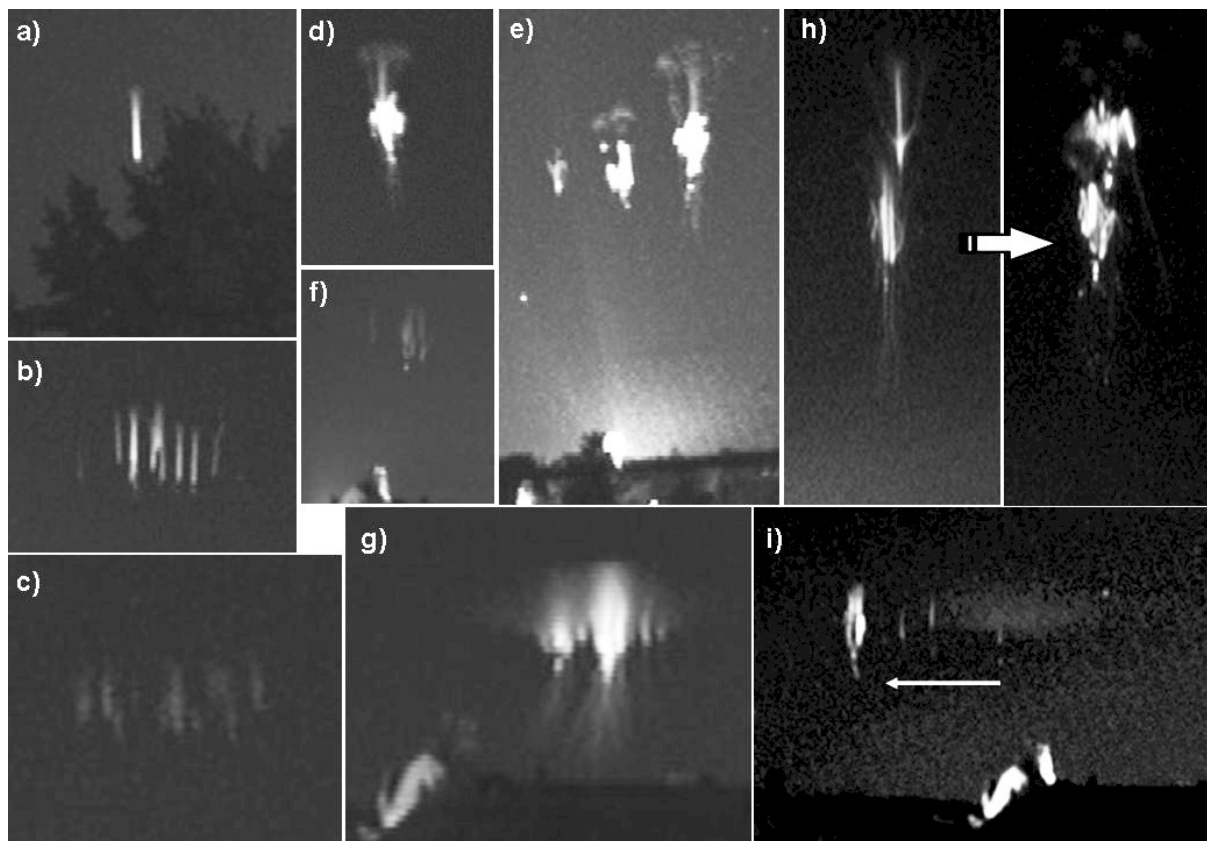
2007 júliusában gyakorlatilag egyidőben, ám egymástól függetlenül indult meg FEOE észlelés több közép-európai országból. Lengyelországban a „SPARTAN sprite-watch” csapat a sopronihoz hasonló felszereléssel [Iwanski et al, 2009], míg a szlovákiai AGO (Astronomical és Geophysical Observatory, Modra) munkatársai meteorészleléshez felállított megfigyelőrendszerrel [Ondrášková et al., 2010] fényképeztek több felsőlégi emissziót. A megfigyelések indulása óta, 2007-től kezdődően, Közép-Európában (legalábbis e dolgozat megírásáig) a soproni megfigyelőállomásról történt messzemenően a legtöbb sikeres FEOE észlelés: 2008-ban összesen 72 FEOE-t, 2009-ben összesen 264 FEOE-t rögzítettünk.

Egyelőre a 2007-ben megfigyelt események feldolgozását sikerült olyan mértékben elvégezni, hogy az eredmények alapján kvantitatív következtetések is levonhatók. Ebben a fejezetben a közölt eredmények ezért főleg ennek az évnek a tapasztalatait tükrözik. Néhány jelenséget még 2007 során a szlovák kollégákkal párhuzamosan észleltünk. Az egyidejű megfigyelések alapján levonható következtetéseket a dolgozatom VIII., *„Vörös lidércek tulajdonságainak vizsgálata két megfigyelőhelyről történő egyidejű optikai észlelések alapján”* c. fejezetében tárgyalom.

VII.1. Optikai észlelések 2007-ben

A 2007-es évben folytatott megfigyeléseket a soproni Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet tetején felállított mobil észlelőrendszerrel végeztem. Így lehetőség volt a kamera, illetve az észlelőszoftver paramétereinek aktuális láthatósági viszonyokhoz illesztett finomhangolására. Ennek ellenére a megfigyelőrendszer számos nem FEOE eseményt is regisztrált, pl. bogarak, madarak gyors átrepülését a látómezőn, több képpixelt gerjesztő

kozmikus részecskecsoport-bechapódásokat, közelebbi zivatarfelhőket át- és megvilágító kisüléseket és a sűrűbb légkört elérve felizzó meteorokat. A 2007 júliusát és augusztusát lefedő megfigyelési időszak alatt több olyan helyzet is adódott, amikor az észlelési tartományon belül megfelelő aktív zivatar fordult elő, a helyi körülmények azonban (pl. felhős égbolt) nem tették lehetővé az észlelést.



41. ábra: Néhány a Sopronból 2007 nyarán észlelt FEOE-k közül. (A megadott időpontok bizonytalansága +/-10 ms.) **a)** magányos oszlop Németország és a Cseh Köztársaság határán, 07.22. 01:37:03.251 UTC; **b)** oszlopcsoport Németország és a Cseh Köztársaság határán, 07.21. 22:24:49.765 UTC; **c)** látszólagosan körszimmetrikus oszlopcsoport Németország és a Cseh Köztársaság határán, 07.21. 23:12:26.716 UTC; **d)** magányos répa Németország és a Cseh Köztársaság határán, 07.21. 20:58:45.632 UTC; **e)** repák és gondolócsont Németország fölött 07.23. 21:02:20.757 UTC (alul a Soproni Sörgyár kivilágított víztornya); **f)** oszlopok és gondolócsont Románia fölött, 07.30. 22:09:50.815 UTC (alul a soproni főposta épületének teteje); **g)** medúza Románia fölött, 07.31. 01:01:14.829 UTC (alul a soproni főposta épületének teteje és tűzfala); **h)** alakváltó lidérc Magyarországon fölött, 08.10. 20:48:18.687 UTC, a két kép egymás utáni képkockák ugyanazon részletét mutatja; **i)** komplex esemény Románia fölött 07.30. 23:09:25.396-636 UTC, előbb a lidércudvar jelent meg, aztán oszlopok egymás után a nyíl irányában „táncolva”, utoljára a hangvilla/kétágú fa alakú vörös lidérc.

Hat éjszakán azonban a megfigyelőhely 500-600 km-es körzetében összesen 102 vörös lidércet, 4 különálló lidércudvart és egy kék nyalábot (vagy törpét) sikerült rögzíteni. 12 vörös lidérc lidércudvarral együtt jelent meg. Gyűrűlidércek észlelése nem történt. Az észlelt vörös lidércek szinte minden korábban megfigyelt alakban [Williams, 2001] előfordultak. Akadtak oszlop, répa, gondolócsont ('V'), medúza, illetve fa alakú példányok, amelyek néha egyedül, máskor csoportosan jelentek meg Sentman és munkatársai megfigyeléseit idézve

[Sentman et al., 1995]. Ez utóbbi esetben előfordult, hogy a csoport elemei nem egyszerre, hanem egymás után, időben és térben is eltolódva váltak láthatóvá, ami hasonló alakú (itt oszlop) lidércek esetében a mozgás látszatát keltette. Az ilyen előfordulásokat „táncoló” lidércekként (dancing sprites) [Lyons et al., 2000] tartják számon (41.i ábra, az előző oldalon).

Egy másik esetben két egymást követő filmkockán ugyanaz a vörös lidérc két különböző ismert alakban (fa => répa) volt látható (41.h ábra). Nagy időfelbontású videofelvételek alapján ismeretes, hogy a különböző alakú vörös lidércek általában oszlop formában alakulnak ki és bizonyos, eddig nem tisztázott körülmények között alakulhatnak tovább és vehetnek fel további alakzatokat [Stanley et al., 1999; Stenbaek-Nielsen és McHarg, 2008].

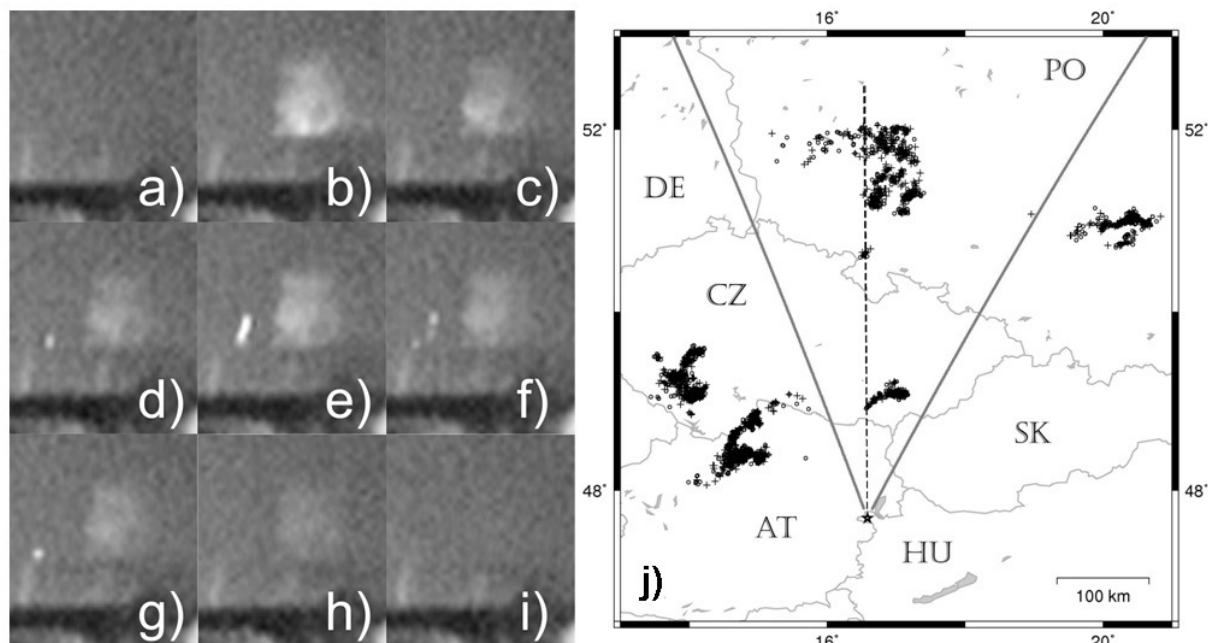
Az észlelt vörös lidércek többségükben 1-2 képkockán (legfeljebb 20-40 ms) voltak láthatók, de akadt olyan eset is, amikor az esemény halványodó, központi, eredetileg legfényesebb részei 6 képkockáig (legfeljebb 120 ms) is felismerhetőek maradtak, ami általános tapasztalat [Lyons et al., 2009]. A legfényesebb, nagy kiterjedésű (pl. medúza alakú) lidérccsoportok általában csak egyetlen képkockán jelentek meg Winckler és munkatársainak megfigyeléseivel összhangban [Winckler et al., 1996]. A lidércudvarok rövid élettartamuk miatt [Barrington-Leigh et al., 2001] legfeljebb egy képkockán voltak láthatók.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a kamera és az észlelőszoftver körültekintő konfigurálása ellenére lehetséges, hogy néhány FEOE-t nem rögzített a megfigyelőrendszer. Például egyetlen lidércudvart sem érzékelt eseménynek az UFO Capture. Ezek az emissziók mind egy-egy rögzítést elindító fényesebb vörös lidérc miatt tárolt időszak belsejében fordultak elő és csak a képkockák tüzetes átnézése után voltak észrevehetőek. Hasonló módon fedeztem fel néhány halványabb vörös lidércet is. Mindez arra utal, hogy specializáltabb eseményészlelési feltételrendszer alkalmazásával ugyanolyan optikai eszközök használata mellett a jövőben több FEOE regisztrálása is lehetséges lehet.

A megfigyelt emissziók többségében nagyobb kiterjedésű zivatarcella rendszerek (mezoskálájú konvektív rendszerek – MCS: mesoscale convective system) fölött alakultak ki, amelyek kiterjedése definíció szerint a 2000 km²-t meghaladja [Lyons, 2006]. Néhány eseményt kisebb, különálló zivatarcella fölött is megfigyeltem. Egy alkalommal az emissziók egy 500-800 km hosszán elnyúlt zivatar front (squall line) fölött jelentek meg.

A videofelvételekkel egyidőben rögzített szcintilláló objektumokat a csillagokkal azonosítva a kamera pontos tájolása és döntési szöge megállapítható. Ez az iránymeghatározás az UFO Capture szoftver UFO Analyzer nevű segédprogramjának a segítségével egyszerűen elvégezhető. A kamera tájolását ismerve a rögzített események

megfigyelési szöge szintén az UFO Analyzer programot használva a képkockákról leolvasható. Amennyiben feltételezzük, hogy a vörös lidércek 50 és 90 km-es magasság között, a lidércudvarok 70-90 km-es magasságban, a kék nyalábok pedig 20-40 km-es magasságtartományban jelentek meg [Lyons, 2006; Pasko, 2006; Wescott et al., 2001], az események megfigyelőhelytől mért távolsága becsülhető.



42. ábra: (a)-(i) a Sopronból észlelt kék nyaláb (vagy törpe) emisszió képsorozata 2007. július 20-án. Az első megjelenés a d) ábrán látható 22:11:10.317 UTC +/-10ms-kor. Az a) képkocka felvételi ideje 22:11:10.257 UTC +/-10ms, a további képkockák 20ms-os időközzel következnek. (j) LINET által észlelt pozitív (keresztek) és negatív (körök) polaritású felhő-föld és felhővillámok Közép-Európa fölött 22:00:00.000 - 22:20:00.000 UTC között 2007. július 20-án. Sopront egy csillag jelöli. A kamera látószögét a folytonos vonalak jelzik. A szaggatott vonal a felvételeken a nyaláb legalsó látható pontjának, illetve a második, f) és g) kockákon látható fényes pontnak az iránya (a szögtávolság a két irány között 0.3°, ezért ekkora lépték mellett ezek nem megkülönböztethetőek). A térképen ábrázolt országokat a kétbetűs ISO kódjukkal azonosítottam. [Bór et al., 2009, Figure 3.]

A távolság ilyen becsléséhez az emisszió típusának egyértelmű azonosítása szükséges. Az egyetlen nem egyértelműen azonosítható típusú megfigyelésünk 2007-ben a kék nyaláb (vagy törpe) volt (42. ábra). A távolság becslését általában segíti az aktív zivatarok helyzetének ismerete. Ebben az esetben azonban két aktív zivatargóc is működött egymás mögött az emisszió irányában (42.j ábra). Amennyiben a távolabbit tekintjük az emisszió forrásának, akkor a jelenséget végmagassága (30-40 km) és sebessége (~150 km/s) alapján a korábbi észlelések tapasztalatait [Wescott et al., 1995] figyelembe véve a kék nyalábok közé sorolhatjuk. Ezt erősíti meg az emisszió tengelyének függőlegessel bezárt szöge is. Másrészt az esemény túl fényes volt, hogy akár monokróm felvételen színét a kék árnyalatával lehessen azonosítani. A megjelenésével egyidőben a közelebbi zivatar felhői is felfénylettek, ami arra utal, hogy az emisszió forrása inkább ezekben lehetett. A közelebbi zivatar távolságában a

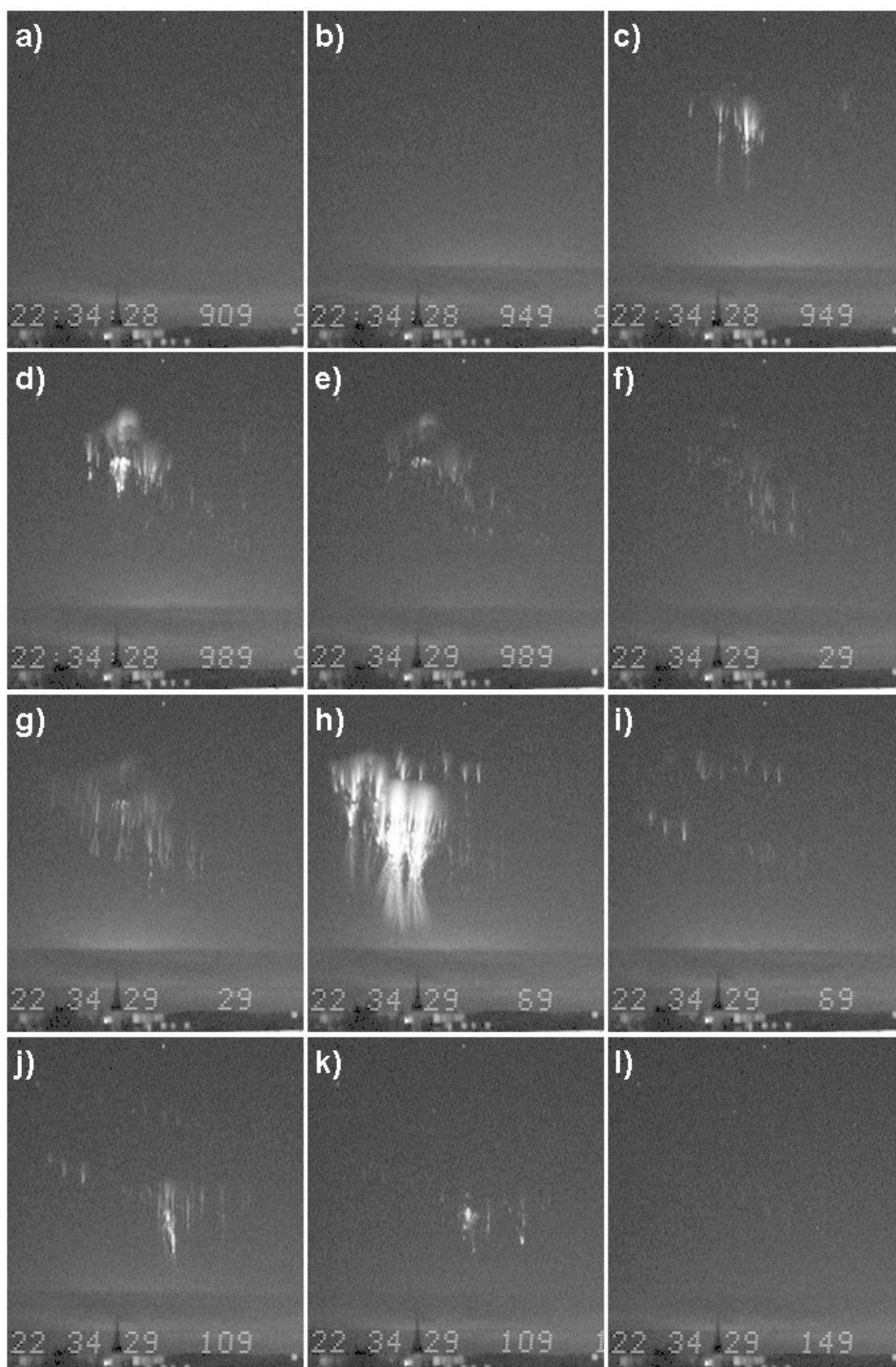
jelenség végmagassága 6-7 km, sebessége kb. 50 km/s lehetett, ami a törpe emissziókat idézi [Lyons et al., 2003a]. A törpék azonban karakterisztikusan vertikális emissziók és korábban csak a zivatarcella kupolájának közelében figyelték meg őket. Sajnos az emisszió és egyúttal a közelebbi zivatarfelhő alsó részét a megfigyelés irányában húzódó dombok eltakarták, így az emisszió kiindulásának tartománya nem látható. A jelenség felfelé történő villámkisüléssel való azonosítása ellen szól, hogy ezek kialakulása a megfigyelések szerint hosszadalmasabb, kb. 1 s [Lyons et al., 2003a], míg a mi megfigyelésünk élettartama mindössze 3 képkocka (<60 ms) volt. A hiányos, illetve ellentmondó tapasztalatok miatt ennek az eseménynek a besorolása sajnos nem lehetséges.

VII.2. Új FEOE típus megfigyelése

A 2007 utáni észlelések során az első évben tapasztaltakhoz hasonló megfigyeléseink voltak, azaz főleg vörös lidércek és néhány lidércudvar megjelenését sikerült lencsevégre kapni. A 2008-as és 2009-es észlelések feldolgozottsága e dolgozat születésének az idején még részleges, ezért ezek közül mindössze egyetlen eseményt szeretnék kiemelni, amely a jól ismert emisszióktól eltérő tulajdonságokkal rendelkezett.

2009. augusztus 2-án egy nagy kiterjedésű mezoskálájú konvektív zivatarrendszer vonult végig a Cseh Köztársaság középső tartományán északi irányban Lengyelország felé. A zivatar fölött jelentős számú (52) vörös lidércet lehetett megfigyelni. 22:34:28.959 UTC-kor egy több vörös lidérc egyidejű, valamint időben egymást követő megjelenésével járó komplex emissziósorozat vette kezdetét (43. ábra, a következő oldalon). Ennek során 22:34:28.979 UTC és 22:34:29.059 UTC között oszlop alakú emissziók sorozata jelent meg (43.d-g ábra), amit késedelem nélkül követett egy nagyon fényes elemekből álló, nagy magasságtartományt kitöltő intenzív vörös lidérc csoport, amelynek legnagyobb része egyetlen képkockán volt csak látható (43.h ábra). Eközben az időben hamarabb megjelenő oszlopok sorozata részben látható maradt. A következő képkockán az emissziósorozat olyan még korábban megjelenő elemei láthatók, amelyeknek főleg a felső részei az intenzív emisszió megjelenésekor újra kifényesedtek. Az oszlopsorozat ezekkel ellentétben nem fényesedett fel, viszont utósugárzása az egykori oszlopok felső részénél halványan továbbra is észlelhető maradt.

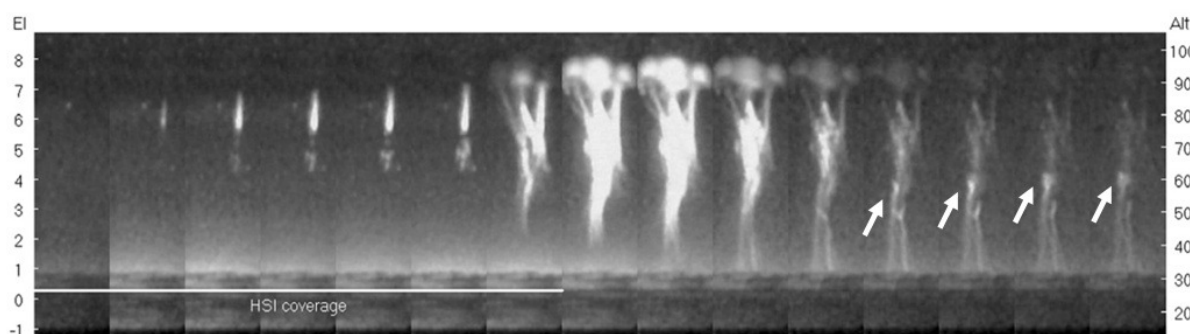
Az ezután következő képkockán (22:34:29.099 UTC-kor, 43.j ábra) valószínűsíthetően a régi oszlopsorozat legtovább észlelhető elemei alatt egy emisszió jelent meg, amelynek nyíl alakú feje felfelé mutatott, megtört szára a hajdani oszlopoknál lejjeből



43. ábra: Sopronból észlelt komplex emissziósorozat 2009. augusztus 8-án, 22:34:28.959 UTC és 22:34:29.119 UTC (+/-10ms) között. Az első képkocka expozíciós ideje 22:34:28.919 (+/-10ms) UTC, a többi képkocka 20 ms-onként követi egymást a)-l)-ig. A „trollók nyila” (lásd a szöveget), a j) képkockán jelenik meg.

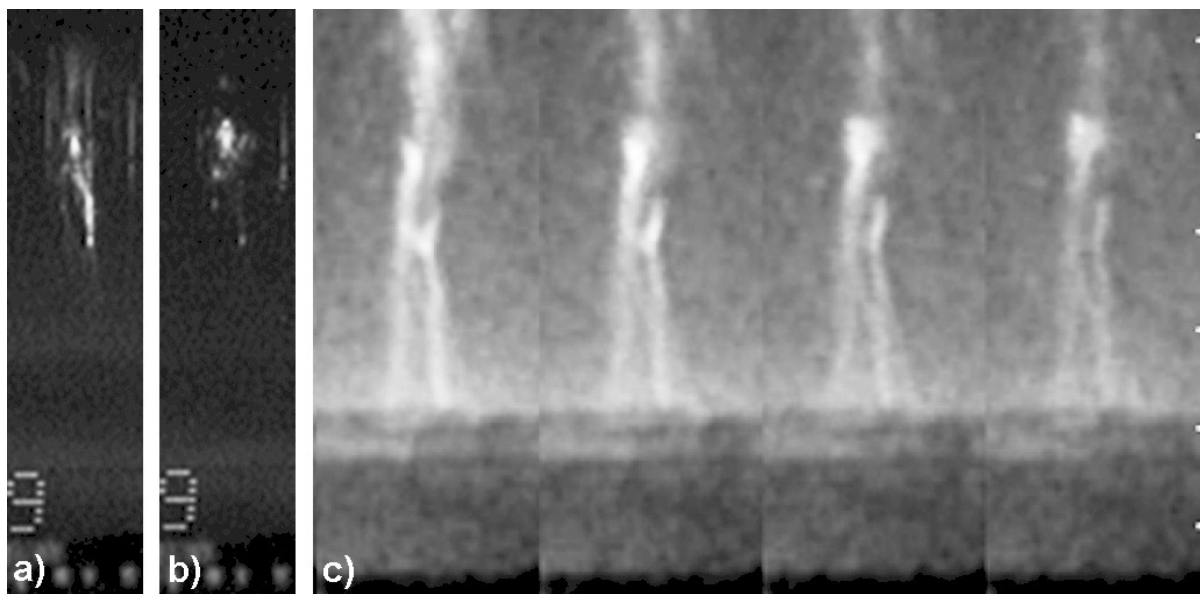
indult és néhány, a répa alakú emissziókra jellemző szál futott ki belőle lefelé elágazóan. Néhány régi oszlop ezen a felvételen újra kifényesedett. A következő képkockán eltűnt a nyíl szára a megmaradt oszlopok legnagyobb hányadával együtt. A nyíl hegye azonban feljebb haladt és némileg kiszélesedett (43.k ábra, az előző oldalon). Az emisszió az ezt követő képkockán tűnt el gyakorlatilag teljesen és ezzel egyidőben halványult el alatta a zivatarfelhő teteje is, amely az emissziósorozat kezdetétől fogva többször felfényesedett ugyan, de folytonosan sugárzott.

Ez a jelenség morfológiai tulajdonságai és időbeli lefolyása alapján nem sorolható be egyik eddig dokumentált FEOE típusba sem. A hozzá leginkább hasonló jelenségek a trollok (I.5., „*Egyéb felsőlégköri elektro-optikai emissziók*” c. fejezet, valamint 11. oldal, 2.k ábra) [Lyons et al., 2000; Lyons et al., 2003a]. Az általam megfigyelt emisszió két tulajdonságában különbözik leginkább az Észak-Amerikában megfigyelt trolloktól. Azok vörösös foltja több megfigyelésből származó tapasztalat alapján nagyobb, intenzívebb vörös lidércek alsóbb régióba lenyúló indáinak mentén, lassan kapaszkodik felfelé (44. ábra). Jelenlegi elnevezésük előtt 'kúszóknak' (crawler) is hívták őket, élettartamuk kb. 100 ms. Az általam megfigyelt esemény közelében szintén történt egy nagyon intenzív felsőlégköri kisülés, azonban a két jelenség jól láthatóan elkülönült és az általam megfigyelt egy korábbi, kevésbé intenzív struktúra aljánál (az oszlopok sorozatánál) jelent meg. Szintén felfelé haladt és jól megkülönböztethető 'feje' volt, azonban az egész jelenség két képkocka ideje alatt, azaz legfeljebb 40 ms alatt teljesen lezajlott (45. ábra, a következő oldalon). Ezenkívül itt a fejnek határozott nyíl (és nem folt) alakja volt, a nyíl szárán pedig jól látható, éles „törés” van, ami szintén új megfigyelés.



44. ábra: Oszlopból kialakuló répa alakú vörös lidérc Észak-Amerikában 1999. augusztus 16-án, 05:10:38 UTC körül. Minden szegmens 17 ms-nyi időt fed le. A baloldalon a skála a horizont fölötti magasság szögét mutatja fokokban, a jobb oldalon a becsült magasságot tüntették fel km-ben. A kép bal részének alján a fehér vonal azt az időtartományt jelzi, amely alatt nagy időfelbontású felvételek is készültek (HSI – High Speed Imaging). Az utolsó négy szegmensben nyíl mutatja egy troll kialakulását és látszólagos mozgását [Stenbaek-Nielsen és McHarg, 2008, Figure 12. alapján].

A morfológiai különbségeket tekintve a Cseh Köztársaság fölött észlelt emisszió a FEOE-k egy eddig nem dokumentált típusa. A trollok és a fent leírt jelenség közötti hasonlóságokat és különbségeket figyelembe véve a megfigyelt felsőléggő kisülést a „trollok nyilának” neveztem el. A jelenség egyéb tulajdonságainak a megismeréséhez (pl. tényleges magasság, földrajzi koordináták, forrásvillámhoz való kapcsolhatóság) további vizsgálatok elvégzése szükséges.

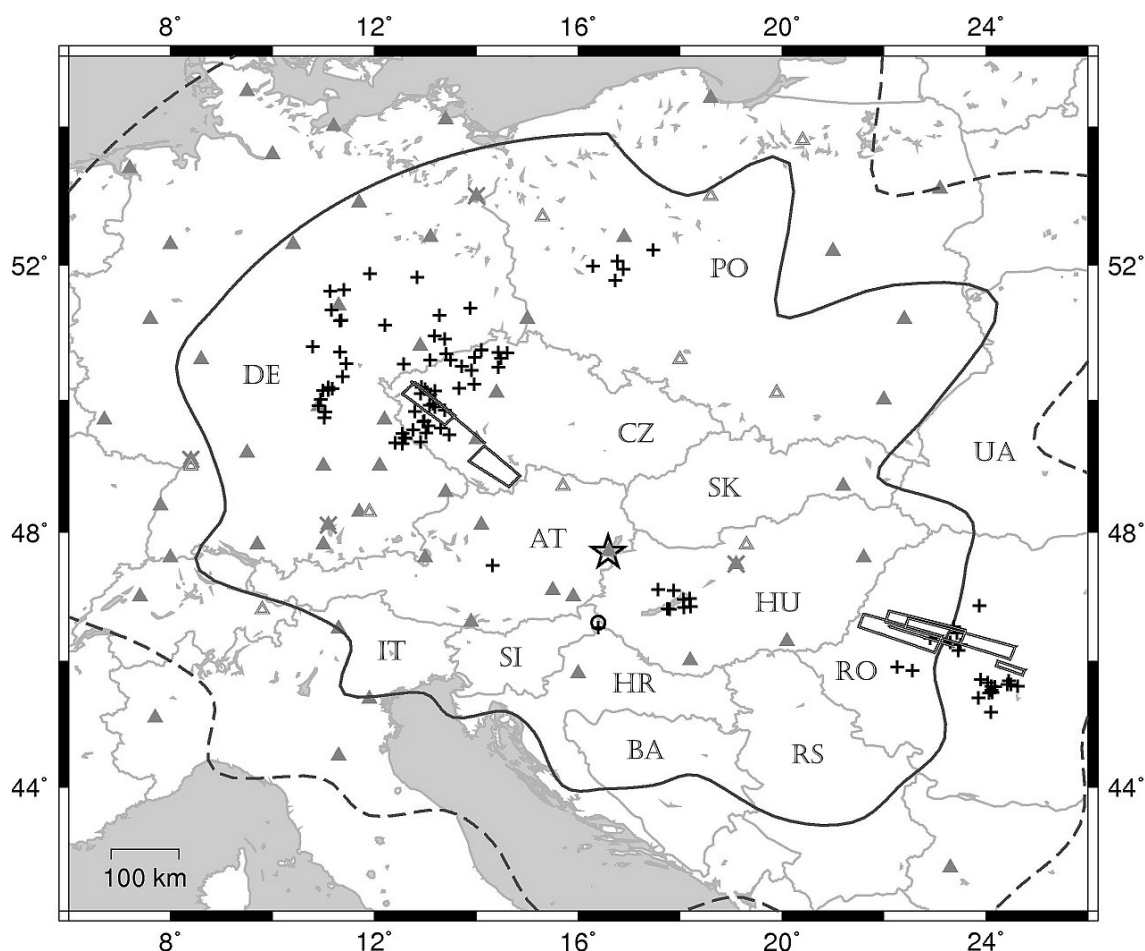


45. ábra: A troll és a trollok nyilának morfológiai összehasonlítása. **a)** és **b)** a 109. oldalon a 43. ábra j) és k) paneljének felel meg. Egymás után következő filmkockák, egyenként 20 ms-nyi időintervallumot fednek le. **c)** az előző oldalon a 44. ábra utolsó négy szegmense. Egy szegmens itt 17 ms-nyi időintervallumot takar.

VII.3. Az emissziókat kiváltó villámkisülések azonosítása

A villámkisülésekhez köthető FEOE-k forrásvillámainak az azonosítását több ismert tényező is segíti: (i) a forrásvillám megelőzi az emisszió megjelenését és az időeltolódás az esetek túlnyomó többségében kevesebb, mint 200 ms [Huang et al., 1999; van der Velde et al., 2006; Matsudo et al., 2009]; (ii) a forrásvillám és az emisszió távolsága általában 50 km-nél kisebb [Lyons, 1996; Wescott et al., 2001; Sao-Sabbas et al., 2003]; (iii) főleg a vörös lidérceket keltő forrásvillámok polaritása jellemzően pozitív és többnyire átlagon felüli intenzitású ELF sugárzást produkálnak [Boccippio et al., 1995; Cummer, 2006]. A közép-európai emissziókat keltő kisülések ELF sávú sugárzásának nyomát a Soprontól kb. 16 km-re fekvő Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium SR mérőállomásának adataiban kerestem. Mivel a FEOE-k általában aktív zivatarok fölött jelennek meg, több, egymáshoz időben közel

regisztrált villámkisülés is potenciális forrása lehet egy-egy emisszió kialakulásának. A fenti három jellemző azonban a legtöbb esetben egyértelmű forrásvillám-hozzárendelést tesz lehetővé.



46. ábra: Sopronból 2007. július 20. és augusztus 14. között megfigyelt FEOE-khez kapcsolható pozitív (keresztek) és negatív (kör) polaritású villámkisülések. A hozzárendelhető LINET villám nélküli események lehetséges helyét magányos emissziók esetén egy-egy szakasszal, csoportos megjelenés esetén bekerített területtel ábrázoltam. A távolságtartományt azzal a feltételezéssel adtam meg, hogy a megfigyelt emisszió teljesen kitölti az 50-90 km-es magasságtartományt. A Sopronból megfigyelhető területet, amely fölött az 50-90 km-es magasságtartomány teljesen belátható, folytonos vonal határolja. A szaggatott vonalon túl már csak a 90 km-es magasság fölé lehet látni. A megfigyelési időszak alatt működő LINET állomások helyét teli háromszögek jelzik. A 2007. augusztus 31-e után megszüntetett állomásokat áthúztam. Az ez után telepített állomásokat üres háromszöggel különböztettem meg a többitől. A térképen ábrázolt országokat a kétbetűs ISO kódjukkal azonosítottam. [Bór et al., 2009, Figure 1.]

2007-ben összesen 98 emisszió esetében (92%) sikerült a forráskisülés azonosítása a LINET adatbázisában található villámok között. A kék nyalábhoz (vagy törpéhez) sem a LINET adatbázisában nem szerepelt hozzárendelhető kisülés, sem ELF tranzienszt nem észleltünk. Ilyet ezen kívül csak egyetlen, vélhetőleg vörös lidérc emisszió esetében tapasztaltunk. További két vörös lidérc emissziónál nem észleltünk semmilyen ELF sugárzást, ezeknél az eseményeknél viszont a többi kritérium teljesülése egyértelműen azonosította a forráskisülést. A többi vörös lidérc és lidércudvar-észlelés esetében mindig találtam

hozzárendelhető ELF tranziens, bár a tranziensek amplitúdója a megfigyelőhelyhez viszonylag közeli források ellenére széles határok között mozgott és néha inkább csak zavarok voltak tapasztalhatók. A kék nyalábon (vagy törpén) kívül összesen nyolc emisszióhoz nem lehetett egyértelműen forráskisülést hozzárendelni. Ezek közül 7 olyan volt, amelynél észleltünk ELF sugárzást, azonban a LINET által regisztrált kisülések közül egyik időpontja sem illeszkedett a SR tranzienshez. Ezen események egy része Románia fölött jelent meg, ami a LINET észlelési területének a külső tartománya volt 2007-ben és ezért a forrásvillámok regisztrálásának hiányát a villámészlelés kisebb hatásfokának tulajdoníthatjuk. Más ilyen események azonban Csehország és Ausztria, illetve Németország határán fordultak elő, ahol a telepített LINET antennák sűrűsége megfelelő volt és így a forráskisülések észlelésének elmaradására ott nincs kielégítő magyarázat (46. ábra, az előző oldalon).

Az azonosított forráskisülések többségükben felhő-föld villámok voltak. 8 esetben fordult elő, hogy felhővillámot lehetett az emisszióhoz hozzárendelni. Ez a jelenség bár nem gyakori, nem számít szokatlannak [Hobara et al., 2001; Neubert et al., 2005; Neubert et al., 2008]. 29 forrásvillámot (30%) a LINET rendszer nem tudott egyértelműen a felhő-föld vagy a felhővillámok közé besorolni. Ezeknek 66%-a (19 villám) olyan terület fölött következett be, amely vagy a LINET észlelési területének határán volt, vagy amelynél a telepített LINET antennák elhelyezése az észlelés időpontjában nem volt kellőképpen sűrű.

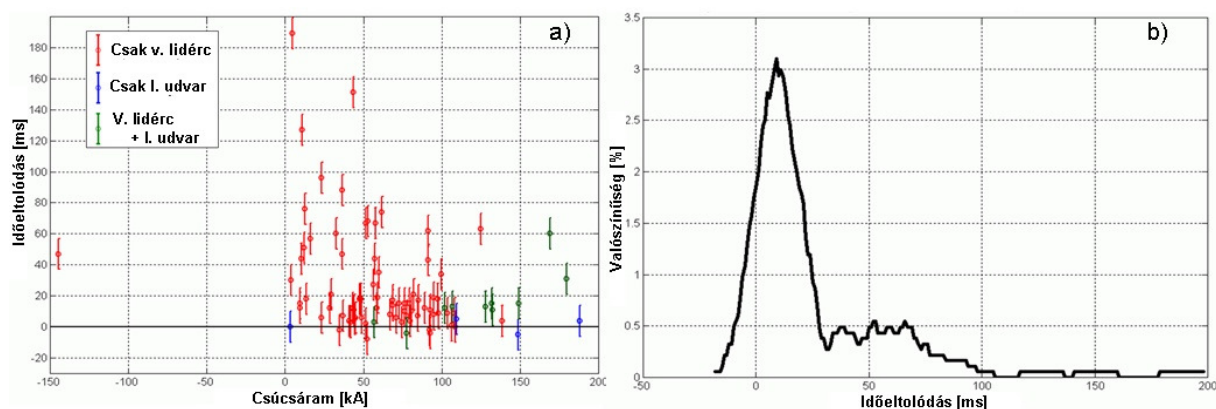
A forrásvillámok polaritása egyetlen eset kivételével pozitív volt. Egy Magyarország fölött észlelt halványabb, oszlop alakú vörös lidérchez a LINET észlelések között negatív polaritású villámot lehetett rendelni. A megfelelő ELF tranziens azonban ellenkező, pozitív polaritású forrásra utalt. Egyetlen hasonló tapasztalatról van tudomásunk Japán közeli észlelések között [Matsudo et al., 2007]. Egy lehetséges magyarázat az ellentmondásos észlelésre, hogy az emissziót keltő kisülés bipoláris tulajdonságú volt [Rakov és Uman, 2003, 5.4. fejezet]. A VLF-LF sávban észlelő LINET rendszer a beérkező jelek első kitérése alapján határozza meg a kisülés polaritását, míg a töltésáramlás iránya a kisülés során megfordulhat és a kiindulásival ellentétes irányban akár domináns is lehet. Ha ez az ellenkező irányú (pozitív polaritású) kisülési szakasz az ELF tartományú sugárzás forrása, az magyarázhatja a látszólag ellentmondó tapasztalatokat.

VII.4. A forráskisülések és az optikai emissziók megjelenése közötti időkülönbség

Az észlelt villámkisülések időpontját a LINET mikroszekundumos (10^{-3} ms) pontossággal adja meg. Az optikai emissziók megjelenési idejének pontosabb meghatározását viszont

korlátozza a video képkockák viszonylag hosszú expozíciós ideje (20 ms). Egy FEOE észlelési idejét annak a képkockának az expozíciós félidejéhez rendelem, amelyen az emisszió vagy bármelyik része először volt egyértelműen megkülönböztethető a háttértől. Ebből adódóan az észlelési időpont ± 10 ms-os bizonytalansággal terhelt.

A forráskisülések és az optikai emissziók megjelenése közötti időkülönbségeket a kisülések LINET által meghatározott csúcsáramának (a kisülés közben előforduló maximális áramerősség) függvényében ábrázoltam. Az ábrán zöld színnel különböztettem meg azokat a vörös lidérc eseményeket, amelyeknél a forráskisülés lidércudvar megjelenését is kiváltotta. Ezekben az esetekben a feltüntetett időeltolódás a vörös lidércre vonatkozik. A kapcsolódó lidércudvarok, hasonlóan a külön forráskisülésű lidércudvarokhoz, amelyeket kék színnel jelöltem, sohasem különültek el 10 ms-nál jobban az őket előidéző villámtól (47.a ábra).



47. ábra: a) Sopronból 2007 nyarán megfigyelt FEOE-k megjelenése és az ezeket keltő villámkisülések közötti időeltolódás a kisülés csúcsáramának függvényében ábrázolva. A ± 10 ms-os időbizonytalanság a video képkockák expozíciós ideje miatt áll fenn. b) Az időeltolódások előfordulásának valószínűsége az a) ábra alapján számolva az időbizonytalanságot is figyelembe véve.

Az optikai megfigyelések viszonylag nagy időbeli bizonytalanságai miatt az emissziókhöz rendelt időpontok eloszlása helyett kiszámoltam annak a valószínűségét, hogy egy adott időeltolódás milyen valószínűséggel esik egy megfigyelt emisszióhoz rendelt megjelenési időpont ± 10 ms-os környezetébe (47.b ábra). Az eredményeket megvizsgálva az alábbi következtetéseket vonhatjuk le.

Nem fordult elő, hogy egy emisszió bizonyíthatóan a forráskisülés bekövetkezése előtt elkezdett volna kialakulni, azaz a -20 ms-os és az ennél kisebb időeltolódások előfordulásának valószínűsége zérus. Ez a megfigyelés összhangban van a vörös lidérc és lidércudvarok kialakulását magyarázó elmélettel, amely szerint ezen felsőlégköri elektromos kisülések kialakulásához szükséges elektromos tér villámkisülés következményeként alakul ki a zivatarfelhő és az ionoszféra alsó határrétege között [Rakov és Uman, 2003, 14. fejezet; Pasko, 2006].

A valószínűség változása három időeltolódás-tartományt jelöl ki: rövid időeltolódások 30 ms alatt, közepes időeltolódások 30 ms és kb. 100-110 ms között és a hosszú időeltolódások tartománya 100-110 ms fölött. Leggyakrabban rövid időeltolódások várhatók és a legvalószínűbb időeltolódás 10 ms körüli. A közepes értékek csoportjának egy szélesebb maximuma van az 50-70 ms-os tartományban. A hosszabb időeltolódások előfordulása a legkevésbé gyakori. Ebben a tartományban nem volt annyi észlelt esemény, hogy a tartományon belüli eloszlást vizsgálni tudtam volna. A legnagyobb tapasztalt időeltolódás 190+/-10 ms volt.

Ezek az eredmények határozott eltérést mutatnak a Japán környékén észlelt jellemző keltővillám – vörös lidérc időeltolódásokhoz képest [Matsudo et al., 2009], ahol a Japán-tenger, illetve a Csendes-óceán fölött átlagosan 90 ms-os, illetve 43 ms-os időkülönbségeket tapasztaltak. Greenberg és munkatársai is ezekhez hasonló értékeket kaptak kelet-mediterrán vörös lidérc észlelésekkel összefüggésben [Greenberg et al., 2007]. Másrészt a közép-európai vörös lidércek időeltolódásainak eloszlása megegyezik az Észak-Amerika fölött észlelt vörös lidérceknél tapasztaltakkal [Bell et al., 1998; Huang et al., 1999; Sao-Sabbas et al., 2003], ahol szintén a 30 ms-nál kisebb értékek száma dominált. A Nyugat-Európában észlelt vörös lidércek esetében talált időeltolódások jellemzői is általánosságban ehhez a vonalhoz állnak közelebb, a vizsgálatba bevont események száma (10, [van der Velde et al., 2006]), más esetben pedig a hisztogram időfelbontása [Mika et al., 2005] azonban nem elegendő a részletesebb összehasonlítás elvégzéséhez.

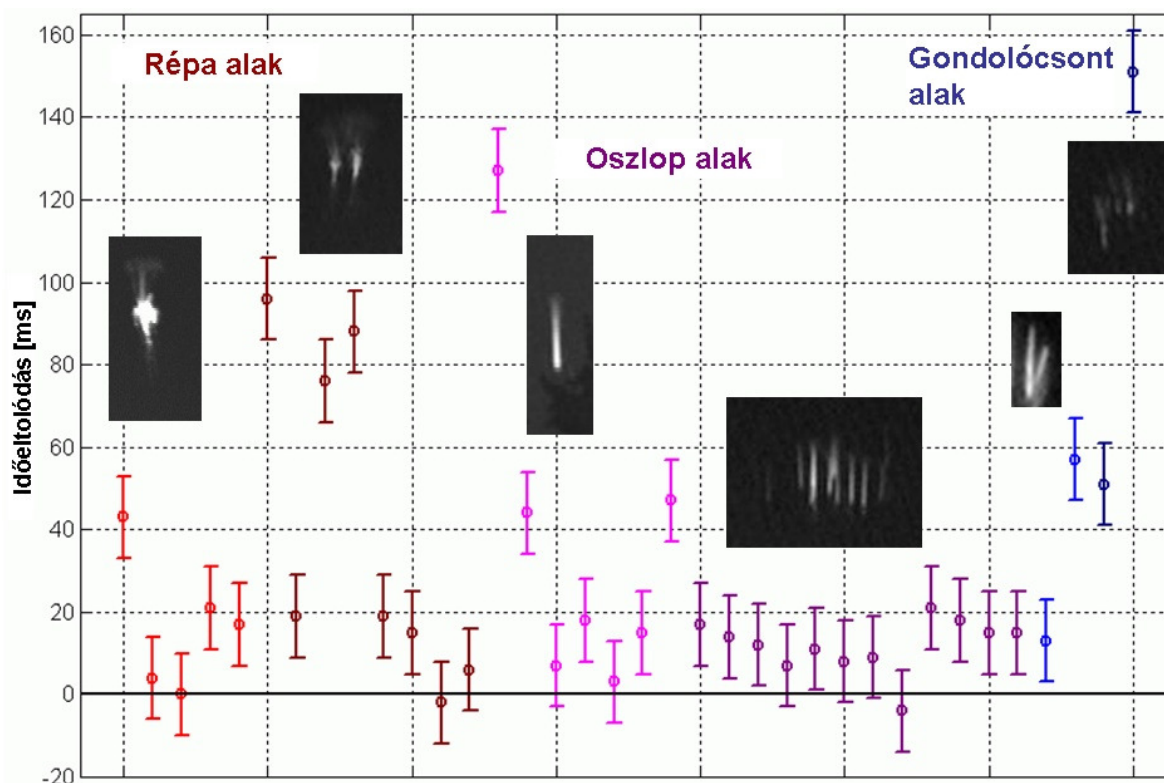
Az eredményeket összefoglalva kijelenthetjük, hogy a közép-európai vörös lidércek megjelenése és az őket kiváltó villámkisülés közötti időeltolódás jellemzően 30 ms alatti érték, ami más, ugyancsak kontinentális területek fölött észlelt vörös lidérceknél tapasztaltakkal megegyező tulajdonság. Az időeltolódások 3 csoportjának (rövid: <30 ms, közepes: 30-110 ms és hosszú: >110 ms időeltolódások) elkülönítésével eddig nem találkoztam a szakirodalomban, ami valószínűleg arra vezethető vissza, hogy a korábbi vizsgálatok vagy nem dolgoztak fel egyszerre ennyi (92) eseményt, vagy az időeltolódásokat nem vizsgálták olyan pontossággal, amely a három kategória elkülönítéséhez szükséges.

VII.5. A vörös lidércek alakja és megjelenésük forráskisüléstől számított időeltolódása

Van der Velde és munkatársai 2006-ban rámutattak, hogy a vörös lidércek két leggyakrabban megfigyelt alakját tekintve az oszlop alakú emissziók átlagos időeltolódása az őket kiváltó

villámkisüléstől átlagosan kisebb lehet (<30 ms), mint a répa alakú társaik esetében (63 ms). Magasabb értékekkel, de hasonló különbséget találtak a két megjelenési forma forrásvillámtól való időeltolódásában a kelet-mediterrán térségben (oszlop / répa : 65 ms / 80 ms) [Greenberg et al., 2007] és Japán közelében is (oszlop / répa : 80 ms / 100 ms) [Matsudo et al., 2009]. Matsudo és kollégái a két leggyakoribb alak mellett megkülönböztettek egy harmadik, ún. V formájú vörös lidércet is [Matsudo et al., 2007] is, ami a besorolási szempontok alapján (az alsó végükön összeérő kétágú forma) valószínűleg megegyezik a gondolócsont alakúval [Moudry et al., 1998] (105. oldal, 41.e és 41.f ábra).

A 2007-ben született viszonylag nagyszámú vörös lidérc megfigyelés Közép-Európában lehetővé tette, hogy az emisszió – forrásvillám időeltolódásoknak a kapcsolatát ne csak az emisszió alakjával, hanem a megjelenő lidércelemek számával is megvizsgáljam. Az elemzésbe csak olyan eseményeket válogattam be, amelyek csoportos megjelenés esetén ugyanolyan alakú elemekből álltak. Megkülönböztettem oszlop, répa és gondolócsont (V) alakú előfordulásokat és mindegyik csoporton belül elkülönítettem a magányos előfordulásokat a kettő vagy több elemet tartalmazó csoportoktól. A megfelelő időeltolódásokat az 48. ábrán tüntettem fel.



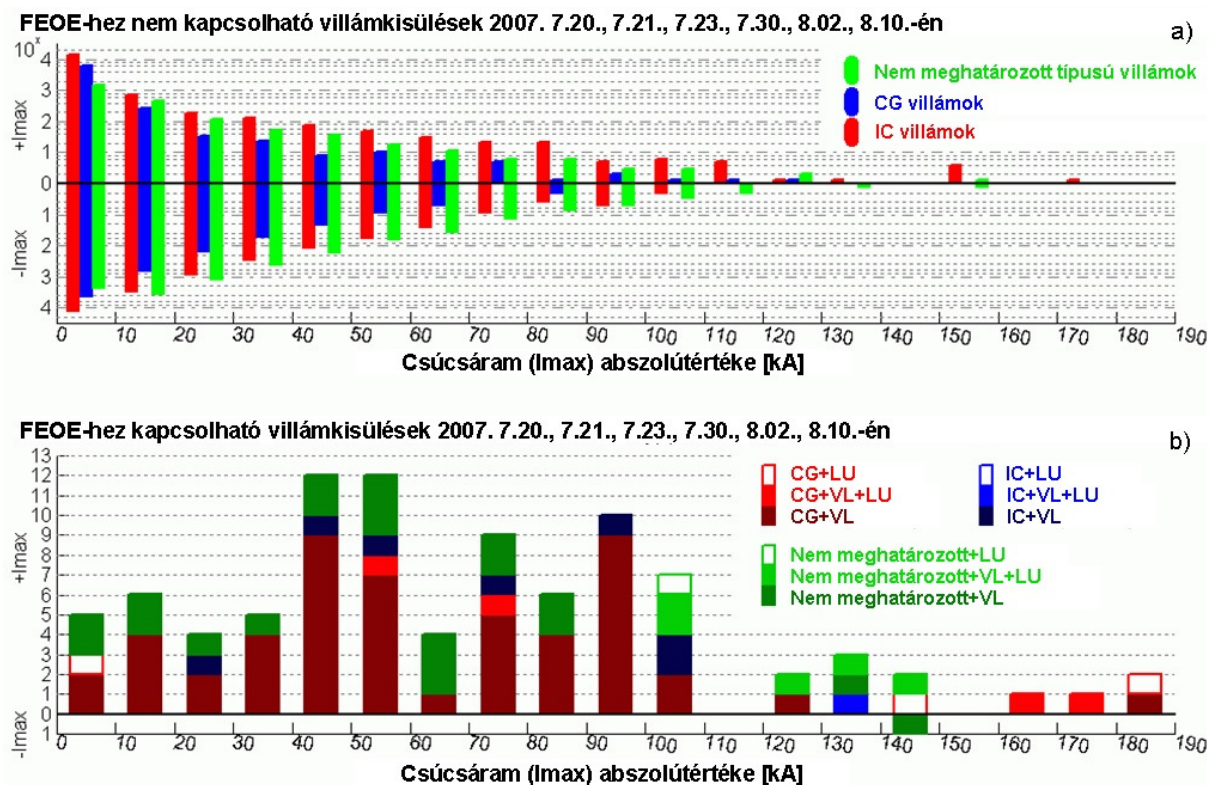
48. ábra: Sopronból 2007 nyarán megfigyelt különböző alakú vörös lidércek megjelenése és az ezeket keltő villámkisülések közötti időeltolódás. Az eltérő formájú emissziókhoz tartozó adatokat más-más színnel jelöltem, a csoportban megjelent események időeltolódásait sötétebb színárnyalattal különböztettem meg a magányos emissziókéitól. Csak egyértelműen besorolható formájú emissziókat vontam be a vizsgálatba és csak olyan csoportokat, amelyekben csupa egyforma alakú elem volt. A ± 10 ms-os időbizonytalanság a video képkockák expozíciós ideje miatt áll fenn.

Az eredmények arra utalnak, hogy Közép-Európában nincs számottevő különbség a különböző alakú vörös lidércek megjelenésének a forrásvillámtól számított időeltolódása között. Az egyetlen, következetesen jelentkező jellegzetesség a csoportosan előforduló oszlopoknál tapasztalt rövid időeltolódás volt, ami okozhatta a korábbi vizsgálatokban az oszlop alakú megjelenések átlagosan kisebb időeltolódását.

VII.6. Az emissziókat kiváltó villámkisülések csúcsáramértékei

A kisülés közben előforduló maximális áramerősséget (csúcsáram) a villám VLF/LF frekvenciasávban mért sugárzásából a LINET meghatározza [Betz et al., 2009]. A megfigyelt FEOE-kat kiváltó villámkisülések csúcsáramainak hisztogramjában (49.b ábra, a következő oldalon) különböző színnel jelöltem a felhő-föld (CG – cloud to ground, piros) és a felhővillámokat (IC – inter/intra-cloud flash, kék), valamint azokat a kisüléseket, amelyeknél a LINET nem tudta egyértelműen meghatározni a kisülés típusát. Az utóbbi villámok egy része a villámfigyelő hálózat által lefedett tartomány peremén, illetve olyan területen fordult elő, ahol a hálózatnak kevesebb észlelőantennája volt telepítve a megfigyelés idején, így a villámkisülés valamennyi paraméterének az egyértelmű meghatározása nem volt lehetséges. Az egyes típusokon belül sötétebb árnyalattal ábrázoltam azokat a villámokat, amelyek kizárólag vörös lidérc kialakulását okozták, világosabb árnyalatúak pedig azok, amelyeknél a vörös lidérc mellett lidércudvart is megfigyeltünk. A kitöltetlen oszloprészek azoknak a kisüléseknek a számát mutatják, amelyeknél csak lidércudvart észleltünk.

Az eloszlás legszembetűnőbb tulajdonsága a polaritásbeli aszimmetria. Az észlelt emissziókat kiváltó villámkisülések egyetlen (nem egyértelmű eset, lásd az VII.3., „Az emissziókat kiváltó villámkisülések azonosítása” c. fejezetet) kivételével mind pozitív polaritásúak. A vörös lidérceket kiváltó villámkisülések jellemzően pozitív polaritása ismert tulajdonság, bár ezen aszimmetria oka jelenleg még nem teljesen tisztázott [Boccippio et al., 1995; Williams et al., 2007] (lásd még e dolgozat V.6., „Következtetések” c. fejezetét). Lidércudvarok esetében azonban a forrásvillámok gyakoribb negatív polaritását figyelték meg [Frey et al., 2007] (és lásd e dolgozat V.5., „Lidércudvar észlelések a FORMOSAT-2 műholdról 2004-2007” c. fejezetét), a közép-európai észleléseink között azonban egyetlen negatív polaritású lidércudvar sem szerepel. A tapasztalatok ennek tükrében arra utalnak, hogy kontinens fölött megfigyelt lidércudvarok esetében az emisszió fényessége pozitív polaritású kisülések esetén nagyobb lehet.



49. ábra: a) FEOE-khez nem kapcsolható, a kamera látómezőjén belüli, LINET által észlelt villámkiülések csúcsáramérték-eloszlása (a nagy különbségek miatt az események számát logaritmusskálán ábrázoltam). A vizsgálatba bevont kiüléseknél a lehetséges emissziók legfeljebb 50 km-es horizontális eltolódását vettem figyelembe. Eltérő színnel jeleztem a felhő-föld (Cloud to Ground - CG) és a felhővillámokat (intra/inter-cloud - IC), valamint a LINET által nem besorolt típusúakat. **b)** Sopronból 2007 nyarán megfigyelt FEOE-k forrásvillámjainak csúcsáramérték-eloszlása. A felhő-föld (CG), felhő (IC) és a nem megadott típusú forrásvillámokon belül megkülönböztettem a csak vörös lidércet (+VL), a csak lidércudvar (+LU) és a mindkettőt (+VL+LU) előidéző kiületeket.

A FEOE-k megjelenésével összefüggésbe hozható csúcsáramértékek széles határok között változnak (3.4-188 kA). A 110 kA alatti értékek nagyobb számban fordulnak elő, azon belül pedig a 40-110 kA-es tartományban található viszonylag több villámkiülés. Az eloszlás jól egyezik az Észak-Amerikában tapasztaltakkal [Huang et al., 1999]. A villámok típusa (CG/IC) szerint nem ismerhető fel eltérés a csúcsáramértékek eloszlásában, ellenben a kiváltott emissziók típusát tekintve igen. Kb. 110 kA-es csúcsáramérték fölött a villámkiülések jellemzően lidércudvar megjelenését is kiváltják. Ez a megfigyelés összhangban van a műholdról történt megfigyeléséből levont következtetéssel, amely szerint a lidércudvarok keletkezésének feltétele, hogy egy jelentős amplitúdójú elektromos tér gyorsan épüljön fel [Adachi et al., 2009]. Számottevő térerősség rövid idő alatti kialakulásához a felsőléggörben a felhő egyik töltéscentrumának gyors eltűnése szükséges, ami nagy áramerősségek előfordulását feltételezi. Hozzá kell tennünk azonban, hogy egyrészt lidércudvarokat kisebb csúcsáramú villámkiülésekhez köthetően is megfigyeltünk, másrészt néhány villámkiülésnél nem jelent meg lidércudvar a kiülés nagy csúcsárama ellenére sem.

Ezek alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy nagy csúcsáramú ($> \sim 110$ kA) villámkisülések fölött a lidércudvarok megjelenése nagyon valószínű, ugyanakkor a forráskisülés magas csúcsárama önmagában nem elégséges, de nem is mindig szükséges feltétele ezen emissziók kialakulásának.

A csúcsáramértékek és az emissziók megjelenési idejének a keltővillámtól való időeltolódását vizsgálva megállapítható, hogy hosszú időeltolódások csak kis csúcsáramértékek esetén fordultak elő, vagy másképpen nézve nagy csúcsáramértékeknél a vörös lidérces időeltolódása legfeljebb közepes volt (< 60 ms) (114. oldal, 47.a ábra). Ez a tulajdonság is a közép-európai és az észak-amerikai vörös lidérceket keltő villámkisülések hasonlóságára utal [Fukunishi et al., 2002; Lyons et al., 2009].

VII.7. FEOE-kat kiváltó és nem kiváltó villámkisülések összehasonlítása a csúcsáramértékek alapján

A kutatók a FEOE-k felfedezése óta igyekeznek körülhatárolni és megtalálni azokat a tényezőket, amelyek meghatározzák az emissziók létrejöttét. A felsőléggöri kisüléseket kiváltó forrásvillámok számos jellemző tulajdonságára derült fény, amelyek közül azonban egyik sem bizonyult feltétel nélkül kritikusnak. (Talán az egyetlen kivétel a gyűrűlidérces optikai intenzitása és a forráskisülés VLF sávú sugárzási intenzitása közötti szoros összefüggés [Barrington-Leigh et al., 2001; Rakov és Uman, 2003, 14.4. fejezet].) A vörös lidérceket például az esetek túlnyomó többségében pozitív polaritású felhő-föld villámok keltik [Boccippio et al., 1995; Lyons et al., 2008], ugyanakkor ritkán, de előfordulnak negatív forrásvillámok által kiváltott vörös lidérces is [Barrington-Leigh et al., 1999; Sao-Sabbas et al., 2003]. Szintén a vörös lidérces esetében a forráskisülés intenzív ELF sávú sugárzása jellemző, de a megjelenést nem meghatározó tulajdonság [Boccippio et al., 1995; Riesing et al., 1996; Greenberg et al., 2007]. Bár a forráskisülések elméleti megfontolások alapján kritikusnak várt töltésmomentum-változása [Rakov és Uman, 2003, 14.3.3. fejezet; Pasko, 2006] számos, több vörös lidércet produkáló zivatarban különböző, de határozott alsó küszöbértéket mutatott [Cummer és Lyons, 2005], megfigyelések bizonyítják, hogy ezek az emissziók alkalmanként előfordulhatnak ellentmondásosan alacsony töltésmomentumú villámkisüléseket követően is [Cummer, 2006].

A LINET által szolgáltatott villámparaméterek egyike a kisülés csúcsáramértéke. Ennek a paraméternek a szerepét a FEOE-k megjelenésével összefüggésben a közép-európai

megfigyeléseinket felhasználva vizsgálhatjuk, mivel az optikai megfigyelések időszakainak, a kamera irányának és az objektív látószögének ismeretében különválaszthatók a LINET által észlelt villámkisülések közül azok, amelyek FEOE megjelenését kiváltották, azoktól, amelyek nem. Az összehasonlításba bevonható villámkisülések kiválasztásához első közelítésben a kamera látószögén belül azt a távolságtartományt vettem figyelembe, amelyen belüli kisülések fölött az 50-90 km-es magasságtartomány teljes egészét a kamera képe lefedte. Mivel biztosnak kellett lennem abban, hogy a vizsgált kisülések által esetlegesen keltett emissziók a kamera látószögén belül jelentek meg, a figyelembe veendő villámkisülések előzetesen meghatározott forrásterületét a határa mentén további 50 km-rel csökkentettem. A forráskisülés 50 km-es körzetén kívül a felsőlégköri emissziók kialakulásának valószínűsége csekély [Lyons, 1996; Wescott et al., 2001; Sao-Sabbas et al., 2003].

Az elemzésbe bevonható villámkisülések csak egy kis hányada okozta FEOE-k megjelenését. Amíg ezek számát a csúcsáramuk függvényében lineáris skálán ábrázoltam, a felsőlégköri kisüléseket nem keltő villámok számát logaritmusskálán vettem fel (118. oldal, 49.a ábra). Utóbbiak esetében is megkülönböztettem a felhő-föld típusú, a felhővillám típusú és a LINET által nem besorolt típusú kisüléseket, azokon belül pedig a pozitív és negatív polaritásúakat. A LINET által nem kategorizált villámok egy része a villámfigyelő hálózat által lefedett tartomány peremén, más része pedig olyan területen fordult elő, ahol a hálózatnak kevesebb észlelőantennája volt telepítve a megfigyelés idején, így a villámkisülés valamennyi paraméterének az egyértelmű meghatározása nem volt lehetséges.

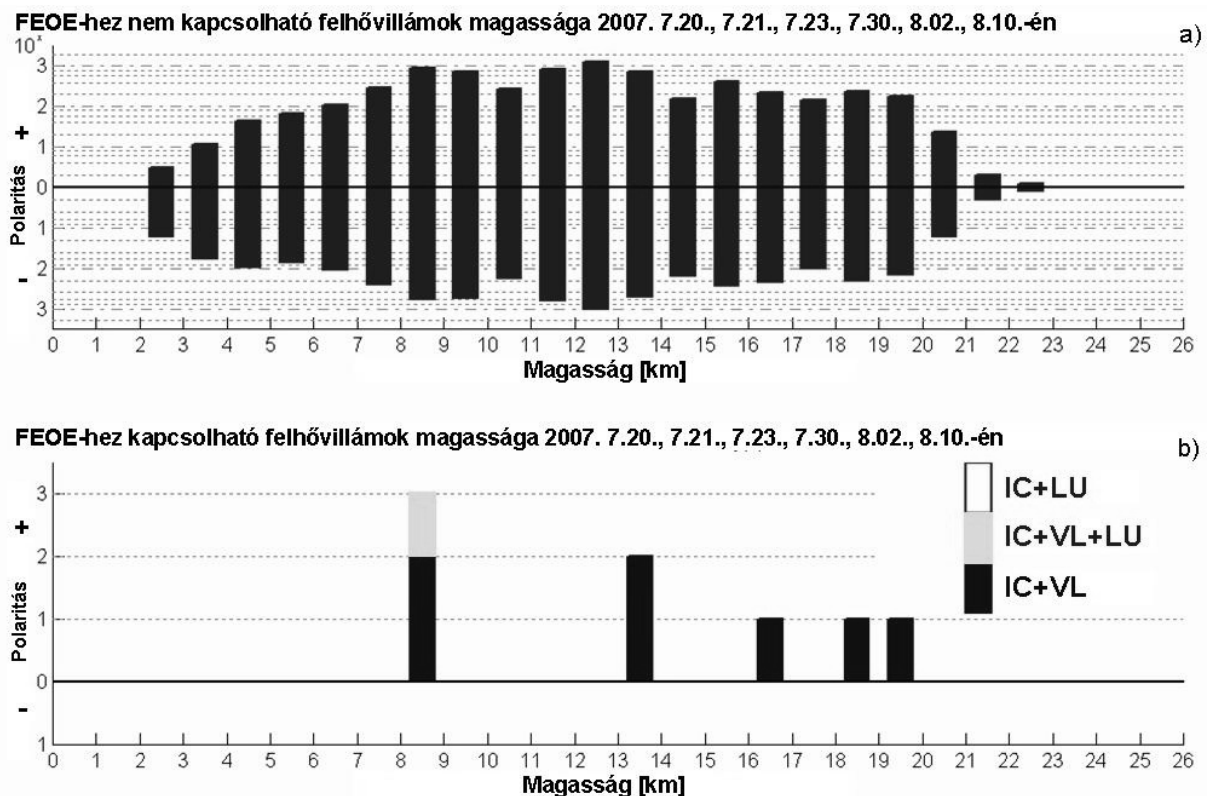
A FEOE-kat nem keltő villámok több jellemző tulajdonsága is leolvasható a hisztogramról. A kis csúcsáramú kisülések (<10 kA) között kb. egyenlő számban vannak jelen a pozitív és a negatív polaritásúak. 10 kA és 50 kA között a negatív polaritású villámok száma valamivel nagyobb, aztán 60 kA fölött a pozitív polaritású kisülések kerülnek túlsúlyba. A kisülések száma a csúcsáram értékével logaritmikusan csökkenő tendenciát mutat. A legtöbb villám csúcsáramértéke nem haladja meg a 20 kA-t, a 60 kA feletti csúcsáramú kisülések előfordulása pedig kifejezetten ritkának mondható. A LINET által észlelt kisülések között a felhő-föld típusúak száma minden csúcsáramértéknél felülmúlja a felhővillámokét, 20 kA felett ez akár egy nagyságrendnyi eltérést is jelenthet. Ez ellentmondani látszik annak, hogy a felhővillámok és a felhő-föld villámok aránya átlagosan 3 körüli [Rakov és Uman, 2003, 2.7. fejezet], viszont megfigyeléseink során mi általában kifejeztük, illetve késői fázisban levő zivatargócokat figyeltünk meg, ahol ez az arány gyakran fordított, 1 alatti érték [Betz et al., 2009].

A FEOE-kat, esetünkben vörös lidérceket és lidércudvarokat keltő villámkisülések csúcsáramok szerinti eloszlásának tulajdonságait az előző, VII.6., „*Az emissziókat kiváltó villámkisülések csúcsáramértékei*” c. fejezetben részleteztem. Az emissziókat nem kiváltó villámkisülések statisztikájával összehasonlítva ezek a villámok a nagyobb töltésmomentumú kisülések közé tartoznak. Látható, hogy kisebb számuk 100 kA fölött a kisülések teljes számának csökkenése miatt tapasztalható, részarányuk az adott csúcsáram-tartományba eső kisülések teljes számához mérten magas. Ez a tulajdonság a forráskisülés csúcsáramának emelkedésével a FEOE-k megjelenésének növekvő valószínűségére utal [Lyons et al., 2009]. Bár a felsőlégköri kisüléseket keltő villámok csúcsárameloszlása jelentősen különbözik az ilyen emissziókat nem kiváltó villámok csúcsárameloszlásától, nem találtam olyan szempontot, amely alapján a csúcsáramokat tekintve egy villámkisülés FEOE generáló képessége egyértelműen megállapítható lett volna. Ez a tapasztalat megerősíti a más területeken végzett megfigyelések elemzéseiből levont hasonló következtetéseket [Lyons et al., 2003b; Sao-Sabbas et al., 2003; Lyons et al., 2008] és alátámasztja Asano és kollégáinak modellezési eredményeit, amelyek szerint fennmaradó áram mellett a fővillám árama is fontos szerepet játszhat konkrétan a vörös lidércek előidézésében [Asano et al., 2009a]. Egy vagy két villámparaméter azonban nem elegendő a felsőlégköri emissziókeltés potenciáljának jellemzéséhez. Asano modellje szerint az áramerősség különböző időskálájú változásai (pl. az M komponens, 25. oldal, 5. ábra) jelentősen befolyásolják a felsőlégköri kisülések létrejöttének valószínűségét.

VII.8. FEOE-kat kiváltó és nem kiváltó villámkisülések összehasonlítása a felhővillámok magassága alapján

A LINET egyik egyedi tulajdonsága, hogy VLF/LF sávú észlelésekből is képes megbecsülni a felhővillámok magasságát. Ez lehetőséget ad rá, hogy a FEOE-kat kiváltó felhővillámok becsült magasságát összevessük az emissziókat nem produkáló felhővillámok magasságaival (50. ábra, a következő oldalon). Döntő többségben ezúttal is az emissziókat nem produkáló felhővillámok vannak. Magasság szerinti eloszlásuk két jellemző maximumot mutat 8-9 km-es és 12-13 km-es magasságban, ami a szerkezetet tekintve megfelel az általános bipoláris zivatarfelhőnél várhatónak [Thomas et al., 2000; Stolzenburg és Marshall 2009], bár a forrászónák magassága itt nagyobb, mint az irodalomban szereplő 7 km és 10 km körüli értékek. Látható azonban, hogy a LINET körülbelül azonos számú pozitív, illetve

negatív polaritású felhővillámot észlelt mindkét magasságtartományban, de általánosan is a felhő magasságtartományában mindenütt, ami legalábbis az Észak-Amerikában tapasztaltakkal nem egyezik meg. A LINET által becsült magasságértékek megbízhatóságának értékelése túlmutat ennek a dolgozatnak a keretein, mindenesetre a 20 km-es magasságot is meghaladó IC forráshelyek jelenlétére tekintettel kvalitatív következtetések levonásánál nem vállalkozom többre.



50. ábra: a) FEOE-khez nem kapcsolható, a kamera látómezején belüli, LINET által észlelt felhővillámok magasságainak eloszlása (a nagy különbségek miatt az események számát logaritmuskálán ábrázoltam). A vizsgálatba bevont kísérleteknél a lehetséges emissziók legfeljebb 50 km-es horizontális eltolódását vettem figyelembe. **b)** Sopronból 2007 nyarán megfigyelt és felhővillámhoz köthető FEOE-k forrásvillámainak magasságai. Különböző színárnyalattal különböztettem meg a csak vörös lidércet (+VL), a csak lidércudvart (+LU) és a mindkettőt (+VL+LU) előidéző kísérleteket.

Ezek szerint azonban annyit mindenképpen megállapíthatunk, hogy a felsőlégköri emissziók megjelenéséért felelős felhőkisülések határozottan nem a zivatar alsó tartományában következtek be. A FEOE-ket kiváltó és az észlelések során megfigyelt felhővillámok alacsony száma azonban ennél többre aligha enged következtetni.

VIII. Vörös lidércek tulajdonságainak vizsgálata két megfigyelőhelyről történő egyidejű optikai észlelések alapján

VIII.1. Motiváció és kutatási előzmények

Egyetlen állomás optikai megfigyelései alapján a FEOE-k megjelenésének helye legfeljebb becsülhető. Az észlelt esemény iránya a felvételeken látható csillagok helyzetéből a megfigyelés időpontjának, a kamera irányának és a megfigyelőhely földrajzi helyzetének, illetve tengerszint feletti magasságának az ismeretében meghatározható, azonban a távolságának megadásához további információra van szükség. Ideális esetben ez a további információ az emisszió egy másik szögből történt megfigyeléséből származik. Ekkor az emisszió kialakulásának magassága és földrajzi koordinátái minden előzetes feltételezés nélkül meghatározhatók és az így kapott kvantitatív eredmények alkalmasak pl. modellek felállításához vagy éppen a modellezések eredményeinek ellenőrzésére.

A vörös lidércek első háromdimenziós (földrajzi koordináták + magasság) helyzetmeghatározását Sentman és munkatársai végezték el 2 repülőgépről folytatott egyidejű megfigyelések feldolgozásával és rámutattak, hogy a jelenség magassága elérheti a 90 km-t is [Sentman et al., 1995]. Lyons és munkatársai 7 vörös lidérc háromszögeléséből vonták le a következtetést, hogy ezen események horizontális eltolódása a forrásvillámuktól leggyakrabban 50 km-nél kisebb, bár egy esetben 100 km-t meghaladó értéket is találtak [Lyons, 1996]. Ezt az eredményt később Sao-Sabbas és munkatársai megerősítették, miután további 40 esemény háromszögeléssel meghatározott helyét Észak-Amerikában a helyi villámfigyelő hálózat (National Lightning Detection Network - NLDN) által szolgáltatott forrásvillám-koordinátákkal összevetették [Sao-Sabbas et al., 2003]. A legnagyobb horizontális eltolódásértékek itt 100 km alatt maradtak. Sem Lyons, sem Sao-Sabbas csoportja nem vizsgálta a háromszögeléssel meghatározott helyű események magasságát. Wescott és kollégái 7 vörös lidérccsoport oszlop alakú elemeinek helyét és magasságát állapították meg két megfigyelőhelyről származó, párhuzamos észlelések alapján és az oszlopok által elfoglalt magasságtartományra más alakú emissziót nem tartalmazó csoport esetén $76.1(+/-1.4) - 86.4(+/-1.9)$ km-t, répa alakú elemeket is tartalmazó csoport esetén $75.2(+/-1.0) - 81.5(+/-0.2)$ km-t kaptak. Az eseményeknek a keltővillámuktól való horizontális eltolódását illetően eredményeik nem különböztek Lyons csoportjának

megfigyeléseitől [Wescott et al., 1998]. Wescott és kutatócsoportja 2001-ben lidércudvarral együtt megfigyelt vörös lidérc (3 csoport) és egy gyűrűlidérc helyét határozták meg háromszögeléssel nagy időfelbontású (1000 képkocka másodpercenként) felvételek alapján. A gyűrűlidérc 100 km-es magasságban jelent meg [Wescott et al., 2001] jó egyezésben az elméleti eredményekkel [Barrington-Leigh és Inan, 1999]. A megfigyelt lidércudvarok középpontjának magassága 75 km és 78 km között változott, függőleges vastagságuk 6 km volt, átmérőjük pedig 65-66 km. Valamennyi megfigyelt vörös lidérc oszlop alakból formálódott tovább répa alakúvá, legmagasabb részeik 73.5-85 km-es magasságig értek fel.

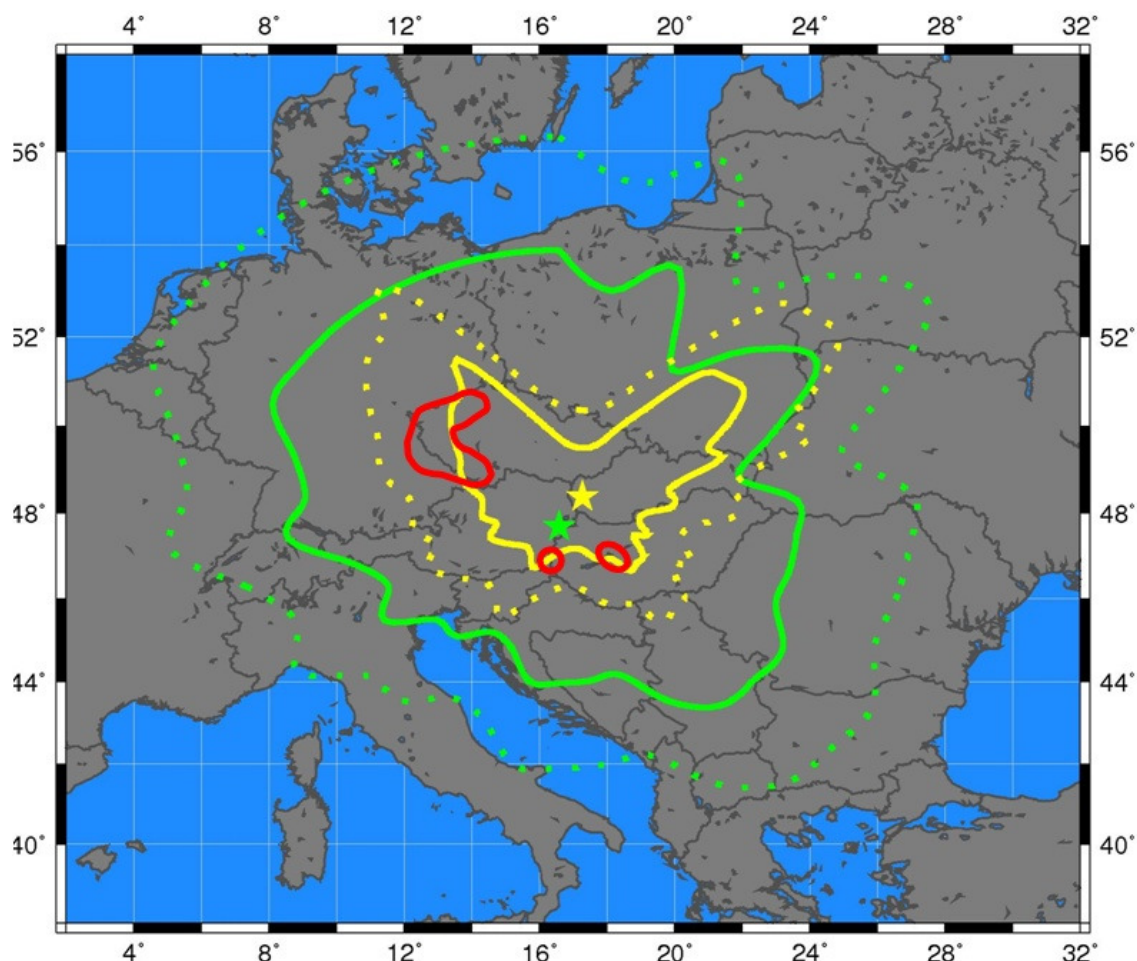
Ezeket az eredményeket állt módomban összehasonlítani 23 vörös lidérc eseményben összesen 64 megfigyelt elem és csoport egyenkénti magasságával, illetve földrajzi helyzetével, amit a soproni és a szlovákiai AGO (Astronomical and Geophysical Observatory, Modra, [17.27° K, 48.37° É]) megfigyelőállomáson Közép-Európában, 2007 nyarán, 3 éjszaka során folytatott párhuzamos észlelések adataiból háromszögeléssel határoztam meg.

VIII.2. Forrásadatok és a háromszögelés módszere

A szlovákiai AGO (Astronomical and Geophysical Observatory, Modra) megfigyelőállomáson 2007. április 1-jén helyezték üzembe a Canon 2.4/15mm-es halszemobjektívvel és Mullard képerősítővel (image intensifier) felszerelt Watec 120N típusú kamerát meteorok észlelésének céljából. A meteorfelvételeket a soproni észlelésekhez hasonlóan az UFO Capture program segítségével rögzítették. A meteorok és a FEOE-k hatékony felismeréséhez leginkább alkalmas programbeállítások különbözősége ellenére a szlovákiai rendszer is felvett néhány vörös lidérc emissziót. 2007. július 21-én 18 db, 23-án 1db, augusztus 10-én 4 db, így összesen 23 db eseményt rögzített egyidejűleg mindkét megfigyelőrendszer.

A soproni és a szlovákiai kamera által lefedett észlelései területet együtt ábrázoltam a közösen megfigyelt eseményeket befoglaló tartományokkal (51. ábra, a következő odalon). Folytonos vonal határolja azt a felszínrészt, amely fölött az adott állomásról a teljes 50-90 km-es magasságtartomány belátható, míg a folytonos és pontozott határvonalak között a kamerák ennek a magasságtartománynak csak egy, a távolsággal csökkenő méretű felső tartományában tudtak észlelni. Amíg a soproni kamera a megfigyelési területén belül egyszerre csak 42°-os látószögön belül regisztrál, addig az AGO kamerája a halszem objektív miatt egyidejűleg majdnem a megfigyelőhelyről belátható egész térrészben észlel. Az AGO-

ból megfigyelhető terület nagyságát a környező erdő fái kívül északi és déli irányban a képmező véges mérete is korlátozza (52.b ábra, a következő oldalon).

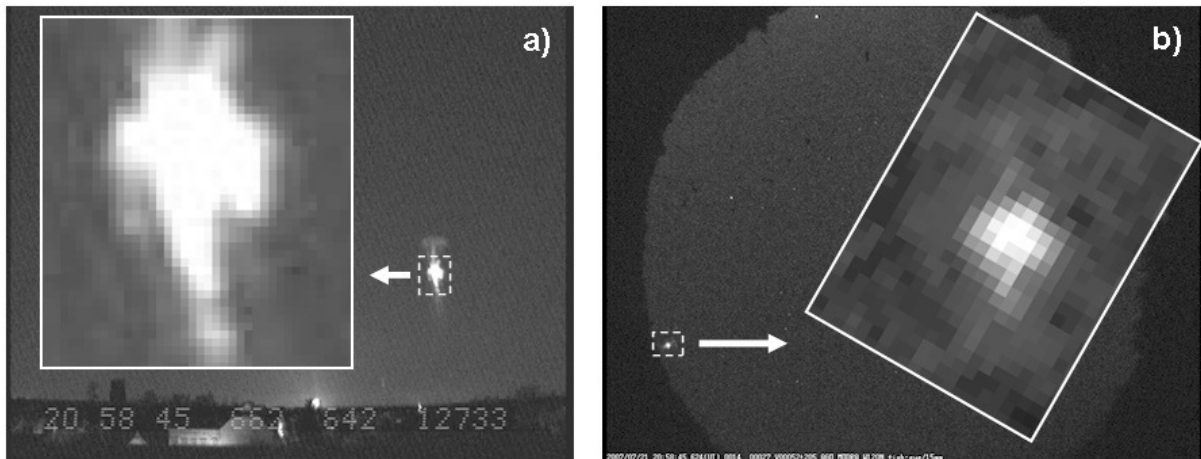


51. ábra: Sopron (zöld csillag) és Modra (sárga csillag) állomások észlelési tartományai. Az állomásokat jelző csillagok színével megegyező színű folytonos vonal határolja azt a területet, amely fölött az 50-90 km-es magasságtartomány teljesen belátható. A pontozott vonalon túl csak a 90 km-es magasság fölé lehet látni. A piros vonal által bezárt területek fölött jelentek meg a két állomásról egyidejűleg megfigyelt vörös lidércek 2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én.

A szlovákiai és a magyar felvételek közötti, a háromszögelés elvégzésének szempontjából súllyal bíró egyik különbség a felvételek idejének a rögzítésében volt. Az AGO megfigyelőrendszere az adatrögzítő PC internetidőhöz rendszeresen szinkronizált órájának időjelével időbélyegezte a felvételeit, ami néhány másodperces pontatlanságot jelentett. Ehhez járult az alkalmazott képrögzítési beállítások miatti kisebb időfelbontás (40ms expozíciós idő képkockánként). Az optikai észlelések nem nagy száma miatt ez szerencsére nem okozott gondot a közösen regisztrált események azonosításában, amit a megfigyelési időpont alapján végeztünk el.

Ennél fontosabb tényező volt az alkalmazott objektívek eltérő látószögéből adódó különbség. A halszem-objektív látószöge $170^\circ \times 140^\circ$, szemben a soproni objektív $42^\circ \times 31^\circ$ -os látómezejével. Mivel a digitalizált kép felbontása hasonló (720×576 képkocka Sopronban,

illetve 720×540 képkocka Modrában), az eltérő nagyságú látómező különböző térbeli feloldóképességet jelent. A soproni észlelések esetén ez a térbeli feloldóképesség nagyobb és a lencse aszféríkussága miatt állandó. A szlovákiai képeknél viszont ez nem állandó, hanem a kép közepén a legnagyobb és a szélek felé közeledve csökken. Mivel a kamerát AGO állomáson függőlegesen felfelé irányították, a horizonthoz közeli tartomány, ahol a távoli vörös lidércek megjelentek, a kép szélére, a kisebb felbontású zónába esett, ami jelentősen növelte az események meghatározott irányának a bizonytalanságát (52. ábra).

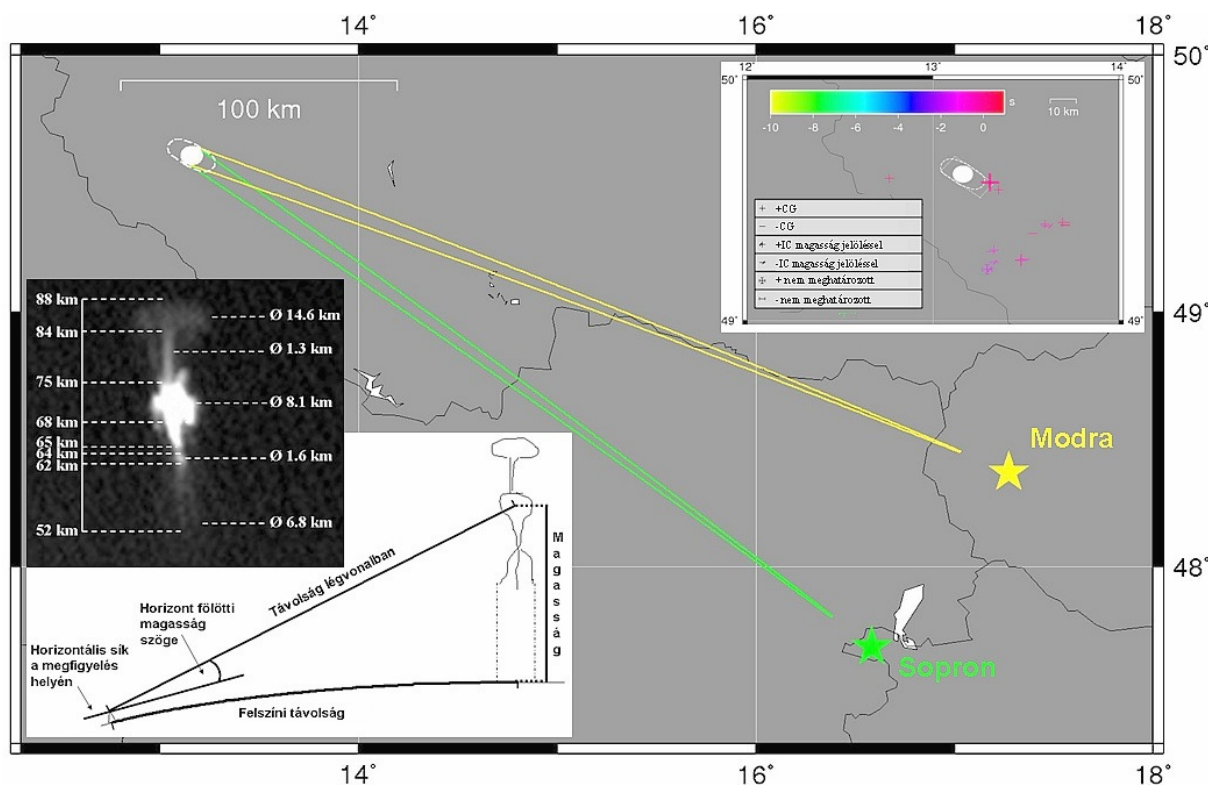


52. ábra: Sopronból (a) és Modra állomásról (b) észlelt répa alakú vörös lidérc 2007. július 21-én 20:58:45.632 +/-10ms UTC-kor. A beágyazott képek az emisszió szaggatott fehér vonallal jelölt kinagyított és Modra állomás esetében vertikális irányba forgatott részletei.

Egy esemény földrajzi koordinátáit a két mérőállomáson meghatározott észlelési irányok metszéspontja adja. Az észlelési irányok megtalálásához először a kamera irányát kellett megadni. Mivel mind a soproni, mind a modrai megfigyeléseknél az UFO Capture program rögzítette az észleléseket, a kamerák irányának a meghatározása a felvételeken látható csillagok helyzetének azonosítása által az UFO Analyzer program segítségével egyszerű volt. Az események felvételi idejének a pontosabb soproni időadatokat fogadtam el. Az UFO Analyzerben betájolt kameraállás esetén a kurzor mindenkor pozíciójához tartozó azimut és a horizont fölötti magasság szöge leolvasható.

Oszlop alakú lidércek esetén, amelyek horizontálisan csak néhány pixeloszlopot fedtek le, a jelenség közepénél a legfényesebb pixelt választottam ki mindkét állomáson a távolság meghatározáshoz. Kiterjedtebb, pl. répa alakú vörös lidércek legszélesebb részénél mindkét állomáson a jobb- és baloldali szélek irányait vettem fel és a két azimutérték feléhez tartozó szöget használtam első közelítésben a további számításokhoz. Később, az esemény távolságának ismeretében a szélek azimutjainak különbségéből az emisszió szélességét, illetve átmérőjét tudtam meghatározni.

Néhány esetben a vörös lidércek olyan nagy számban jelentek meg egy csoportban, hogy vagy a teljes csoportban, vagy a csoport egy részében nem lehetett megkülönböztetni az egyes tagokat. Más esetben nagyjából ugyanazon a helyen, időben egymás után több vörös lidérc is megjelent, de az egyik állomáson a felvétel időbeli felbontása nem tette lehetővé az egyenkénti iránymeghatározást. Ilyen a soproni állomáson is megesett, amikor a beállítások miatt nagyon hosszú képsorok esetében a program a videofelvételt nem őrizte meg, csak azt a képet, amelyen minden pixel fényessége a pixel videofelvétel ideje alatt felvett legnagyobb fényességértéke (ún. peak-hold kép). Olyan is előfordult, hogy távoli eseményeknél a képi felbontóképesség nem volt elegendő az egyes vörös lidércek megkülönböztetéséhez a csoporton belül. Ezekben az esetekben az egész csoportnak, vagy egy jól elkülöníthető részének teljes horizontális kiterjedését mértem fel és ennek a közepét határoztam meg a répa alakú emisszióknál alkalmazott módszerrel.

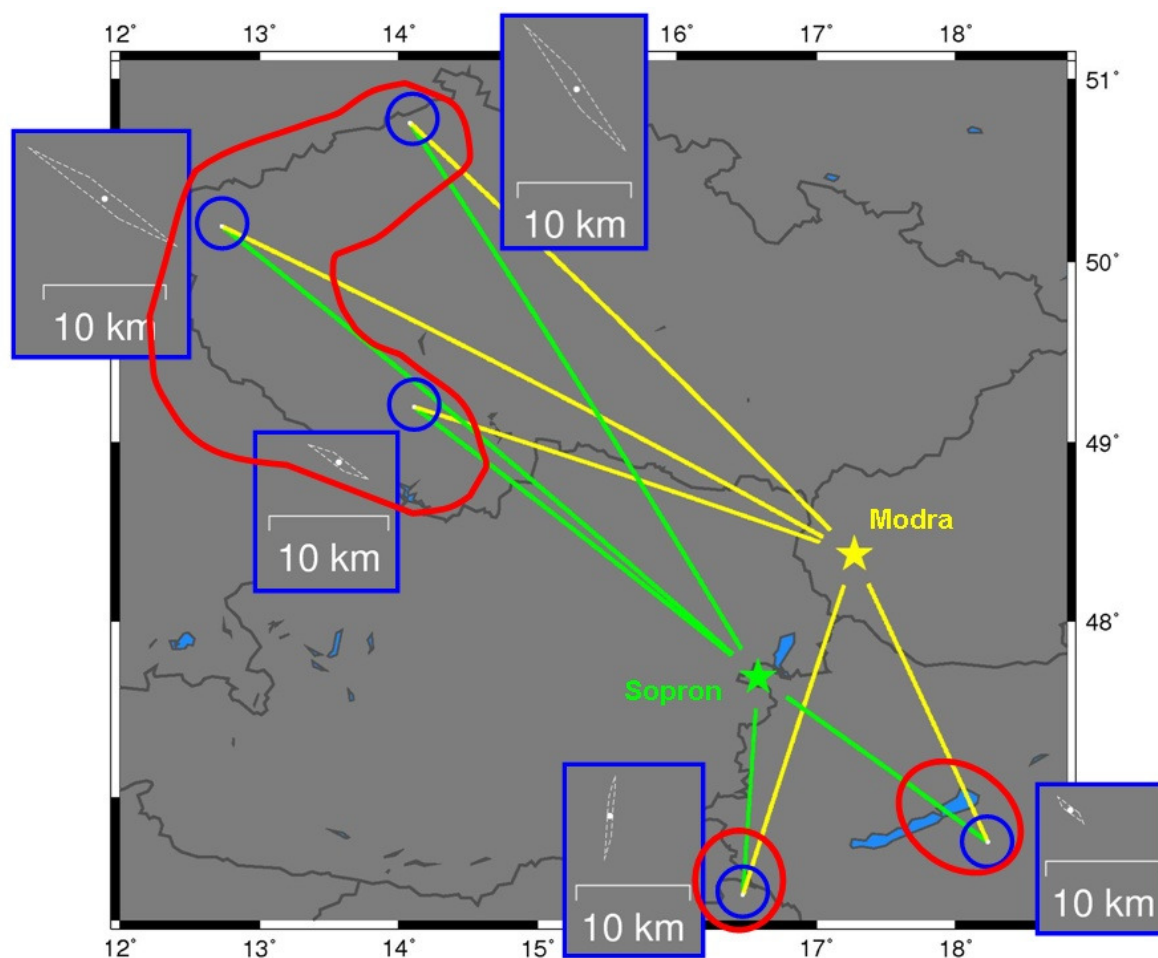


53. ábra: Sopronból és Modráról 2007. július 21-én 20:58:45.632 +/-10ms UTC-kor észlelt répa alakú vörös lidérc helyének és magasságának háromszögelése. Az emissziót a legfényesebb részének megfelelő átmérőjű koronggal ábrázoltam. A szaggatott vonal azt a területet jelzi, amelyen belül a korong elhelyezkedhet a háromszögelés helymeghatározási bizonytalanságának figyelembevételével. A beágyazott képek közül **jobboldalon fent** a nagy képen feltüntetett emisszió és a helyének bizonytalansági területén kívül pontozott vonal jelzi azt a területet, amit azzal a feltételezéssel határoztam meg, hogy az emisszió teljesen kitölti az 50-90 km-es magasságtartományt. Ezen az ábrán a LINET által észlelt villámkisüléseket is feltüntettem. A jelmagyarázatban CG a felhő-föld (Cloud to Ground), IC a felhővillámokra (Intra/Inter-Cloud) utal. A villámjelek színe az optikai észlelés időpontjához (0 s) viszonyított eltolódást jelöli, mérete pedig a csúcsáram ábrázolt kisülésekhez viszonyított relatív nagyságára utal. **Baloldalon lent** a magasság meghatározásánál használt geometriát szemléltetem, fölötte pedig az emisszió részeinek meghatározott kiterjedései láthatók.

A két megfigyelőhely koordinátáinak ismeretében az események irányainak metszéspontja a Föld felszínén gömbi trigonometria segítségével meghatározható. A számítások elvégzéséhez szükséges formulák több helyen is megtalálhatók az interneten (pl. <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>), jómagam egy saját, Matlab 4.2c környezetben implementált kódot alkalmaztam. A háromszögelt koordináták felhasználásával az emisszió talppontjának a megfigyelőhelyektől mért felszíni távolsága kiszámítható. A megfigyelt esemény horizont fölötti magasságának a szögéből ennek a távolságnak a figyelembevételével az emisszió magassága megadható (53. ábra, az előző oldalon). Ez a számítás az UFO Analyzer alapfunkcióinak egyike.

A háromszögelés pontosságát mutatja a két állomáson meghatározott magasságok hibahatáron belüli egyezése. A hibahatárok számításánál három hibaforrást vettem számításba. Az első a kamera meghatározott irányának bizonytalansága. Ennek a felméréséhez ugyanannál a kameraállásnál rögzített több különböző eseménynél is levezettem a kamera irányát. A második hibaforrás a véges képi felbontóképességből adódó iránybizonytalanság. Ennek a felméréséhez a képeken az események által elfoglalt képrészen egymás melletti pixelekhez tartozó irányokat olvastam le. A harmadik hibaforrás a megfelelő pixelek kiválasztásának a bizonytalansága. Ez különösen az események szélénél kritikus, mivel a felvételeken a vörös lidércek nem éles határral, hanem néhány pixelnyi átmenettel különülnek el a háttértől (126. oldal, 52. ábra). A vörös lidérc szélét szubjektív megítélés alapján annál a pixelnél vettem fel, amelyik először (vagy, ha tetszik utoljára) különböztethető meg egyértelműen a háttértől. A pixel kiválasztásából eredő bizonytalanságot ± 1 pixelben határoztam meg. A meghatározott azimut teljes bizonytalansága e három tényezőtől $\pm 0.0951^\circ$ Sopronban és $\pm 0.1696^\circ$ Modrában. A horizont fölötti szögmagasság teljes bizonytalansága $\pm 0.0957^\circ$ Sopronban és $\pm 0.5930^\circ$ Modrában.

A kiterjedésnek a szögmeghatározás pontatlanságából adódó hibája az esemény megfigyelőhelytől mért távolságának függvénye. A megfigyelt események zónáinak különböző helyein meghatároztam az egy ponthoz tartozó bizonytalansági területet, amely a két állomáson különböző mértékű bizonytalanság miatt elnyúlt alakú (54. ábra, a következő oldalon). Egy háromszögelt pont horizontális bizonytalansága a legtávolabbi események esetében sem haladja meg a ± 6 km-t egyik irányban sem. A magasság esetében lényegesen nagyobb a valóságos és az AGO felvételeiből meghatározott értékek lehetséges eltérése a soproni felvételekből származó eredményekkel összevetve. Ezt figyelembe véve egy pont magasságát a földrajzi koordinátáinak meghatározása után legtöbbször a soproni felvételekből határoztam meg, így a kapott magasságértékek hibája legfeljebb 1-2 km.

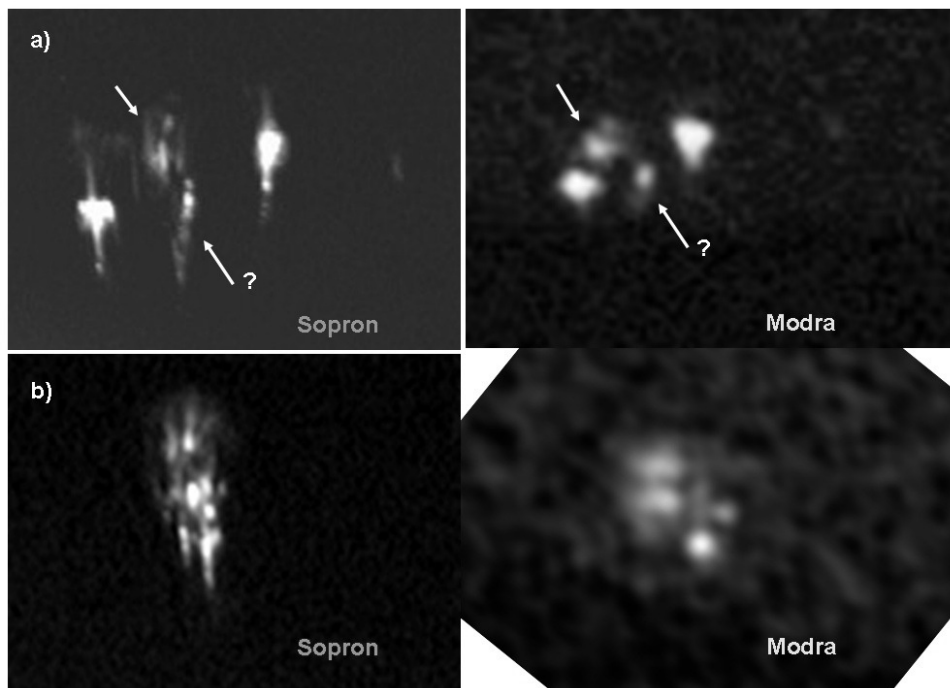


54. ábra: Pont helymeghatározási bizonytalansága háromszögelés esetén azokban a tartományokban, amelyek fölött Sopron (zöld) és Modra (sárga) állomásokon egyidejűleg észleltek vörös lidérceket 2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én (piros vonallal határolva).

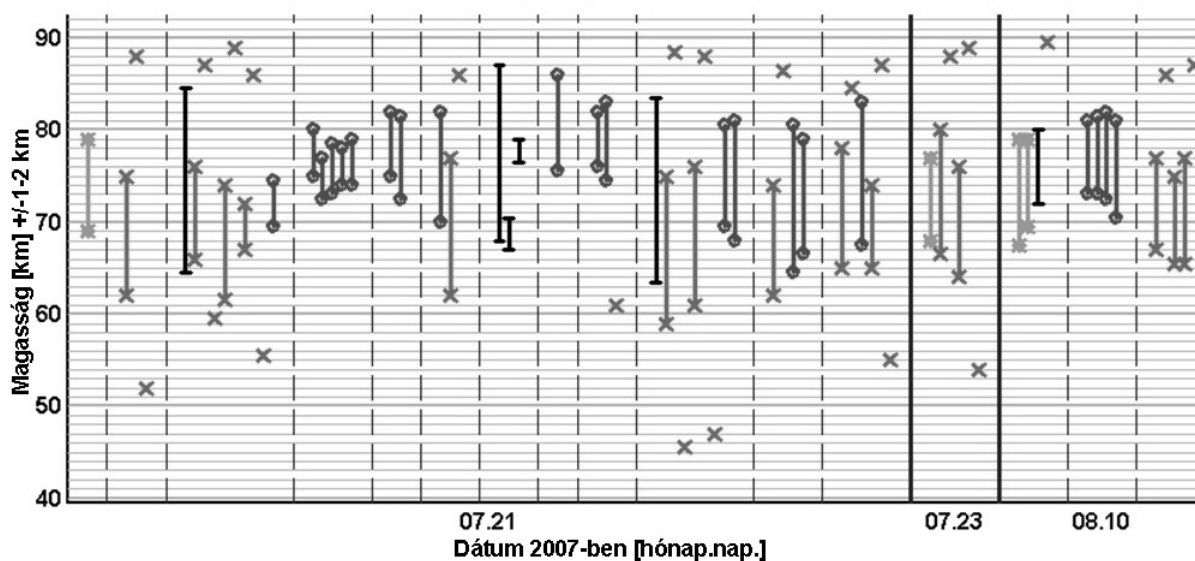
VIII.3. A vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány

Összesen 46 egyedi vörös lidérc magasságtartományát tudtam meghatározni a soproni és a modrai optikai megfigyelésekből háromszögelés segítségével. A levezetett magasságtartományok megjelenítésekor megkülönböztettem az oszlop, répa és gondolócsont (V) alakú emissziókat, valamint néhány szokatlan formát, amely az előző kategóriákba nem sorolható (55. ábra, a következő oldalon). A répa alakú vörös lidérceknél külön meghatároztam a „levélzet” legnagyobb magasságát, a fényes törzs magasságtartományát (amelybe a néha sötét sávval elkülönülő alsó kisebb gömböt is beleértettem) és ahol megfigyelhető volt, a „gyökérzet” (127. oldal, 53. ábra) legmélyebb látható pontjainak a magasságát is. Ezek a lefelé nyúló „szálak” egyetlen esetben július 21-én oszlop alakú vörös lidérceknél is megfigyelhetők voltak.

Az ábrázolásban (56. ábra) megkülönböztettem az eltérő napokon észlelt emissziókat, azon belül pedig különválasztottam az egyes eseményekben megjelent vörös lidérceket, amelyeket ugyanaz a villámkisülés váltott ki. Az eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatók le.



55. ábra: Nem besorolt alakú vörös lidércek egyidejű felvételei Sopronból és Modra állomásról. **a)** emissziócsoport Németország és a Cseh Köztársaság határa fölött, 2007. 07. 21. 21:08:46.483-563 UTC között. Nyilak jelzik a két nem szokványos formát. A kérdőjeles emissziót az analízis során répa alakúnak soroltam be (lásd még a szöveget). **b)** emissziócsoport Németország és a Cseh Köztársaság határa fölött, 2007. 07. 21. 22:56:07.459 UTC-kor.



56. ábra: 2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én Közép-Európa fölött megjelent vörös lidércek által elfoglalt magasságtartományok. 'o' jelöli az oszlop alakú, 'x' a répa alakú, '*' a gondolócsont alakú, 'I' a nem besorolt alakú emissziókhoz tartozó értékeket. Külön jelöltem 'x'-ekkel főleg répa alakú vörös lidérceknél a legmagasabb és a legmélyebb pont helyzetét, ahol a fényes testen kívül (vonallal összekötött jelek) ezek valamelyike vagy mindkettő megfigyelhető volt.

Az ugyanazon villámkisülés után megjelenő oszlop alakú vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány a mérések hibahatárán belül azonos.

Az oszlop alakú vörös lidércek hossza és magassága a különböző esetekben jelentősen változik. Az oszlopok teteje 77-86 km között, az alja 64.5-76 km között jelent meg, hosszuk pedig 4.5-16 km között változott, átmérőjük 0.4-0.8 km volt.

A répa alakú vörös lidércek központi, legfényesebb tartománya az oszlop alakú lidércekhez képest jellemzően alacsonyabban jelent meg. Az ilyen típusú emissziók központi részének közepe kis eltéréssel 70 km-es magasságban található és e fölé, illetve alá is többnyire ugyanannyira nyúlik ki. A központi rész hossza valamivel kisebb változékonyságot mutat, mint az oszlop alak esetében: többségük 9-16 km-es. Mindössze egyetlen 5 km-es, répa alakú test fordult elő, ez az emisszió azonban csak általános szerkezeti tagozódását tekintve sorolható ebbe a típusba, egyébként sokkal vékonyabb volt (55.a ábra, az előző oldalon). A répa alakú lidércek legtöbbször körszimmetrikusak, legnagyobb az átmérőjük a törzs felső részén, ahol a 8-10 km-t is elérheti. A törzs átmérője azonban nem állandó, 1-2 km-től kezdődően több értéket felvehet akár egy csoporton belül is. Az oszlop és a répa alakú vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány itt tapasztalt különbsége nagy időfelbontású felvételek háromszögelésének eredményeiből is adódott [Stenbaek-Nielsen et al., 2010].

A répa alakú vörös lidércek „levélzete”, egy diffúz kisülési régió, az emissziótípus jellemző része. Legnagyobb magassága a répatest hosszától függetlenül elég stabilan 86 km és 89 km között található, horizontálisan kiterjedt, átmérője (>10 km) általában meghaladhatja a test legszélesebb méretét.

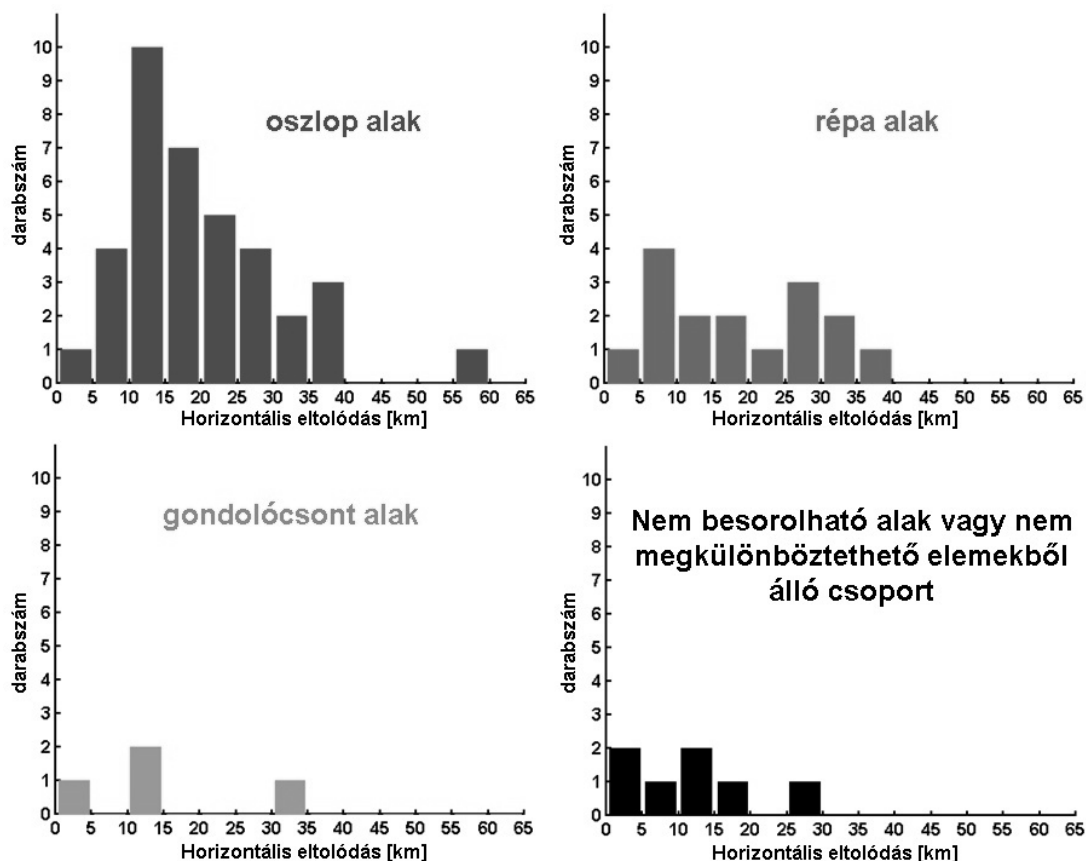
A „gyökérzetet” is gyorsan (lefelé) mozgó kisülési frontok rajzolják az égre. Az ebben a tartományban magasabb légsűrűség miatt azonban a „gyökérzet” színe inkább lilás-kékes, így ez a légkörben intenzívebb Rayleigh szórás miatt különösen nagyobb távolságból nem mindig észlelhető [Stenbaek-Nielsen és McHarg, 2008]. Valószínűleg ez az oka, hogy a répa alakú lidércek esetében sem mindig figyelhető meg és a megfigyelt mélység is változó (45.5-61 km). Érdemes megjegyezni, hogy megfigyelések szerint nemcsak óriás nyaláboknál, hanem répa alakú lidércek esetén is előfordulhat, hogy a lefelé nyúló ágak elérik a zivatarfelhő tetejét [Siefiring et al., 1999]. A lenyúló „szálak” jellemző hiánya az oszlop alakú emissziók esetében a két típus (répa, illetve oszlop) kialakulása közben fennálló különböző energiaviszonyokra utal.

A gondolócsont ('V') alakú vörös lidércek átmenetet képeznek az oszlop és a répa alak között [Stenbaek-Nielsen és McHarg, 2008], pl. az alsó, még nem szétváló részen

vastagságuk 1-2 km, hasonlóan a répa alakú lidércek legalsó részeinek kiterjedéséhez. A vizsgált események között azonban nem volt annyi 'V' alakú, hogy a rájuk jellemző magasságtartományt egyértelműen meg lehetett volna határozni. Ugyanez mondható el néhány, nem besorolható alakú és a kategórián belül is többféle felsőléggöri emisszió esetében is (130. oldal, 55. ábra).

VIII.4. A vörös lidércek és keltővillámaik horizontális eltolódása

Valamennyi háromszögelt helyzetű vörös lidérc megjelenését pozitív polaritású, egyetlen nem meghatározható típusú villám kivételével felhő-föld kisülés váltotta ki. A forráskisülések helyzetét a LINET 0.3 km-nél kisebb bizonytalansággal adta meg. Az emissziók talppontjainak háromszögelt pozíciója helytől és iránytól is függő bizonytalanságot tartalmaz, amely azonban egyik esetben sem haladja meg a 5-6 km-t. Összesen 64 egyedi vörös lidérc, vörös lidérccsoport, illetve részecssoport koordinátáit határoztam meg. Csoportok és részecssoportok esetén az emissziók által elfoglalt térrész középpontját vettem figyelembe.



57. ábra:

2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én Közép-Európa fölött megjelent vörös lidércek és emissziócsoportok horizontális eltolódásai a forráskisülésüktől.

Az eseményeknek a forráskisülésüktől számított horizontális eltolódását tartalmazó hisztogramokról (57. ábra, az előző oldalon) leolvasható, hogy a vörös lidércek jellemzően nem a forrásvillámuk felett jelennek meg. A leggyakoribb horizontális eltolódás 10-15 km. Ez az érték jó egyezést mutat más vizsgálatok során tapasztaltakkal [Lyons, 1996; Sao-Sabbas et al., 2003]. A legtöbb háromszögelt helyzetet oszlop alakú emisszióknál tudtam meghatározni, ezért ezeknél a legegységesebb az eloszlás alakja. A répa alakú felsőlégköri kisüléseknél két jellemző forrásvillám-távolság megjelenése látszik 5-10 km és 25-30 km között. A horizontális eloszlások különböző alakja a répa és az oszlop alakú lidércek kialakulásának különböző módjára utal, gyarapítva a kétféle vörös lidérccel kapcsolatban megfigyelt különbségeket, mint pl. a répa alakú emisszióknak a keltővillámtól mért átlagosan hosszabb időeltolódása, a keletkezést megelőző intenzívebb felhővillám-aktivitás, vagy a forrásvillám kisebb amplitúdójú, de időben jobban elnyúló elektromágneses sugárzása (szferik) [van der Velde et al. 2006; Neubert et al., 2008]. A további, más alakú emissziók alacsony száma (4 gondolócsont és 7 egyéb forma) sajnos nem teszi lehetővé a megfelelő típus szerinti eloszlás becslését.

VIII.5. Vörös lidércek konfigurációja csoportos megjelenés esetén

A csoportokban megjelenő vörös lidércek térbeli elrendeződésével kevés tanulmány foglalkozik, mivel a különálló emissziók helyzetének pontos megállapításához nagy képfelbontású sztereofelvételek szükségesek, amelyek eddig nemigen álltak a kutatók rendelkezésére. Wescott és kutatócsoportja 1998-ban két, több oszlop alakú elemet tartalmazó vörös lidérccsoport tagjainak az elrendeződését határozta meg a helyi villámfigyelő hálózat által megadott forrásvillám helyzetéhez képest [Wescott et al., 1998]. Az egyik esetben az oszlopok helyzetét háromszögeléssel vezették le, a másik esetben azzal a feltételezéssel éltek, hogy az oszlopok ugyanabban a magasságtartományban jelentek meg. Ez a feltételezés a VIII.3., „A vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány” c. fejezetben kapott eredmények szerint helytálló volt. Az oszlopok elrendeződése egyik esemény során sem mutatott jellemző szimmetriát. Az elemek egy tartományon belül elszórtan fordultak elő, miközben a tartomány középpontja a forráskisüléshez képest több 10 km-rel eltolódott.

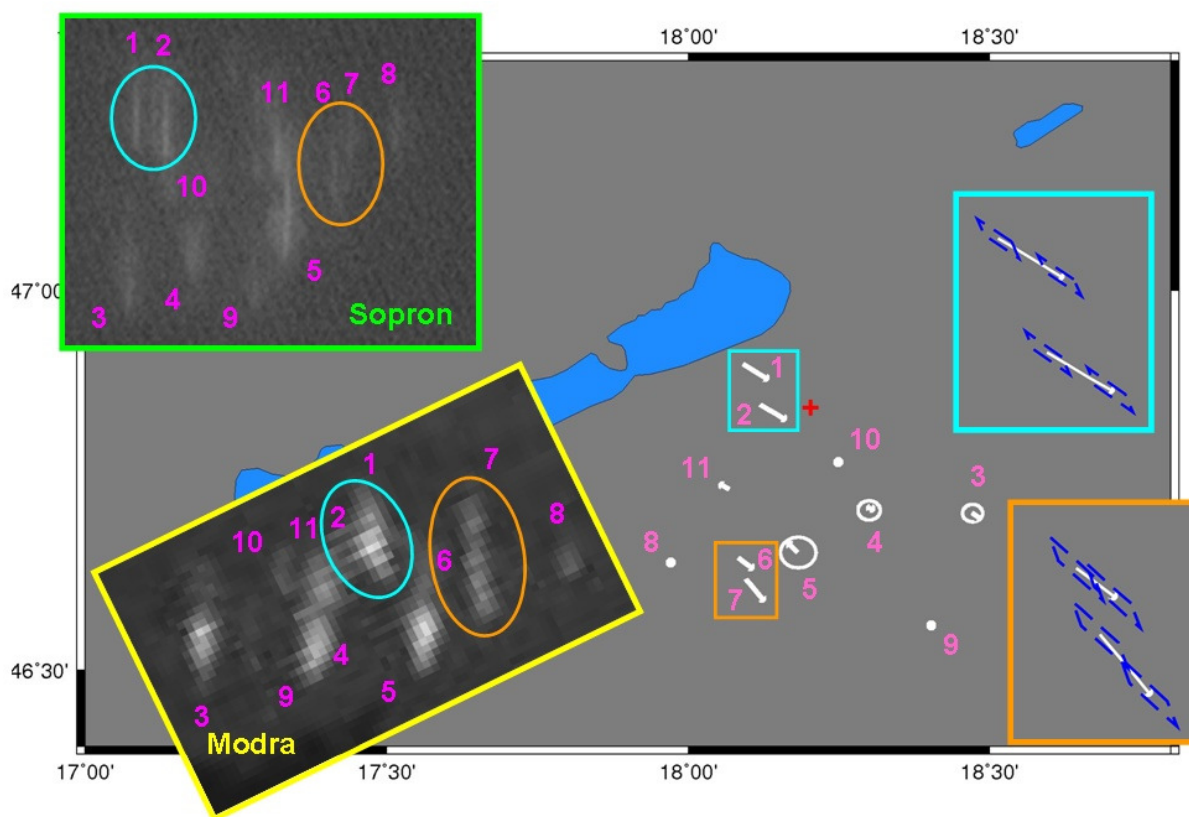
Sato és kollégái különböző Japán iskolákban kezdeményezett, egyidejű FEOE megfigyelések során készült felvételek alapján, háromszögeléssel rekonstruálták oszlop alakú vörös lidércekből álló csoportok tagjainak elrendeződését és több esetben „korona”, illetve

kör konfigurációt jegyezték fel [Sato et al., 2008]. Vadislavsky és munkatársai hasonló megjelenésekre figyeltek fel a kelet-mediterrán területeken és Nyugat-Európában, szintén feltételezve, hogy az egyidejűleg megjelenő oszlop alakú emissziók ugyanabban a magasságtartományban alakultak ki [Vadislavsky et al., 2009]. Figyelembe véve a jelenségek észlelésének geometriáját megállapították, hogy az emissziók megjelenése a forráskisüléseik modellezett kvázi-stacionárius elektromos terének szimmetriáját követi. A közép-európai észleléseink között is előfordult olyan eset, amely valószínűsíthetően ebbe a csoportba sorolható (105. oldal, 41.c ábra).

A soproni és a modrai állomáson egyidejűleg észlelt vörös lidércek többségükben csoportban jelentek meg. A 23-ból mindössze 2 esemény volt egy elemű. Csupán egyetlen olyan eset fordult elő, amikor a háromszögelhető emissziók forráskisülése nem volt azonosítható a LINET adatsoraiban, ezért a forrásvillám helyéhez képest az emissziók elhelyezkedése általában vizsgálható volt. A megfigyelt vörös lidércek esetében nem volt jellemző, illetve egyértelműen felismerhető a körszimmetrikus elrendeződés, sem annak akár a torzult változata. Egyetlen eset kivételével az emissziók inkább a Wescott és kutatócsoportja által megfigyelt, véletlenszerűnek látszó elrendeződést mutatták a megjelenési tartományukon belül (58. ábra, a következő oldalon). Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a 2-3 elemet tartalmazó csoportok esetében a szimmetria meglétét avagy hiányát nem lehet egyértelműen megállapítani, különösen a helymeghatározás bizonytalanságát is szem előtt tartva. A több elemet tartalmazó csoportok pedig többségükben a megfigyelőhelyektől távolabb jelentek meg és valamennyi elemük helyzete külön-külön nem volt háromszögelhető, ami szintén megnehezítette a kiértékelést. Ráadásul a megfigyelések szerint a körszimmetrikusan elhelyezkedő elemek alakja azonos, legfeljebb a kör középpontjában álló elem vagy csoport formája különböző [Vadislavsky et al., 2009]. Az egyetlen olyan háromszögelt eset, amely a torzult körszimmetria jeleit is mutatta, megfelelt ennek a tapasztalatnak (137. oldal, 60. ábra), a vizsgálatban szereplő más események azonban többségükben több, különböző alakú vörös lidércet is tartalmaztak. Összességében kijelenthetjük, hogy a csoportosan megjelenő vörös lidércek körszimmetrikus, illetve ehhez hasonló elhelyezkedése kevésbé jellemző előfordulási konfiguráció, mint a kvázi-rendezetlen elrendeződés a megjelenési tartomány fölött.

Stanley és munkatársai néhány vörös lidérc háromszögeléssel meghatározott helyzetét összevetették a forráskisülés kisülési csatornájának az elővillám VHF (Very High Frequency, 30-300 MHz) sugárzása alapján, 3 dimenzióban feltérképezett orientációjával és horizontális kiterjedésével [Stanley et al., 2007]. Rámutattak, hogy az emissziók jellemzően nem a kisülési csatorna fölött, hanem attól valamivel távolabb jelennek meg.

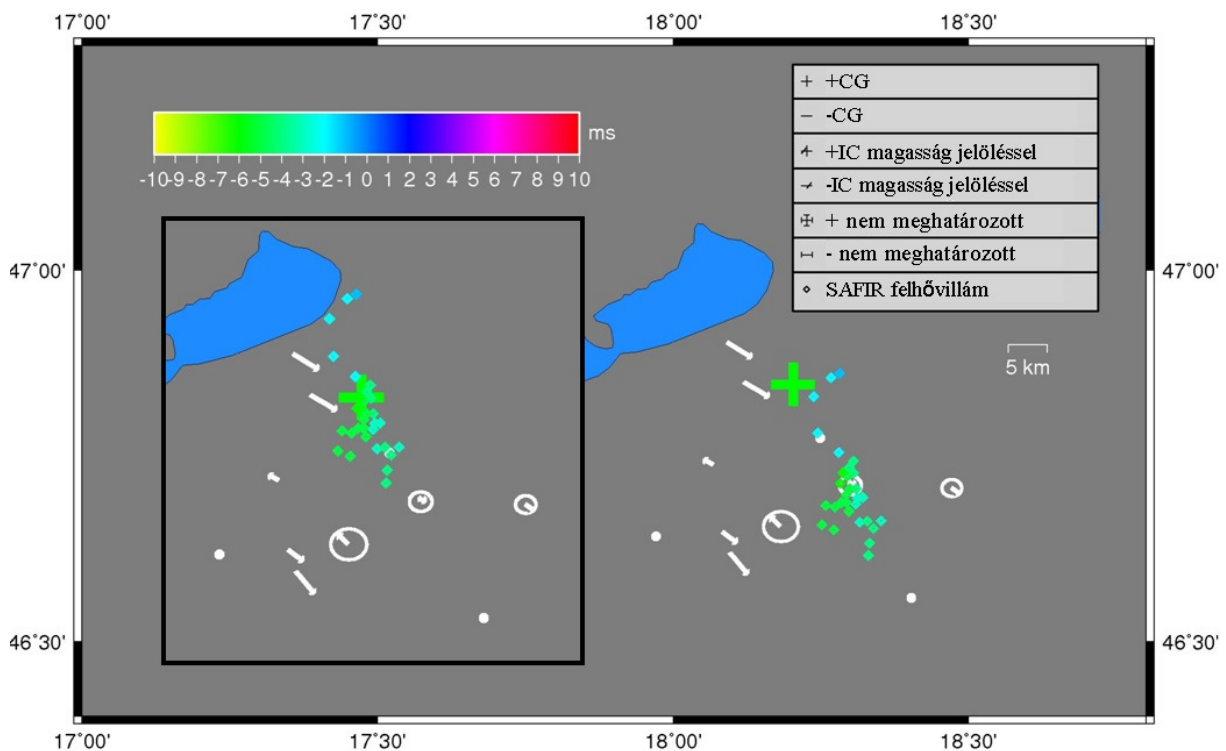
Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Magyarország területén egy VHF+VLF/LF sávban észlelő villámfigyelő hálózatot üzemeltet [Dombai, 2008] az EUCLID európai hálózat [Schulz et al., 2005] részeként. A hálózat interferometrikus elektromos VHF antennái 2 dimenzióban képesek meghatározni az észlelt rádiósugárzás forrásainak a helyzetét. A VHF sávú rádiósugárzás az elővillám előrehaladása közben keletkezik és ezért a kisülési csatorna helyzetére és orientációjára lehet általa következtetni [Rakov és Uman, 2003, 9.3 és 17.6 fejezetek]. Az OMSZ adatainak felhasználásával a Balaton környékén észlelt emissziók esetében lehetőség adódott a forráskisülés horizontális vetületének és a felsőlégköri kisülések konfigurációjának összevetésére.



58. ábra: Csoportos vörös lidérc emisszió 2007. augusztus 10.-én 22:22:55.767 (+/-10ms) UTC-kor Magyarország fölött. A háromszögelt helyzeteket oszlopok esetén fehér pontok, répa alakú lidérceknél körök jelzik. Ahol vertikális dőlést próbáltam meghatározni, ott a felszíni vetület szakaszait ábrázoltam. A felfelé mutató vég pontozott. Piros kereszt jelöli az emissziót kiváltó villámkisülés (pozitív felhő-föld villám, 22:22:55.761 UTC) LINET által megadott helyét. A **beágyazott felvételek** az emisszió képét mutatják Sopronból, illetve Modra állomásról fényképezve. Azonos számmal ugyanazt az emissziót jelöltem. A türkiz és a narancsszínű keretekben levő elemeket kinagyítottam és kék szaggatott vonallal a végpontokhoz tartozó bizonytalansági területeket ábrázoltam.

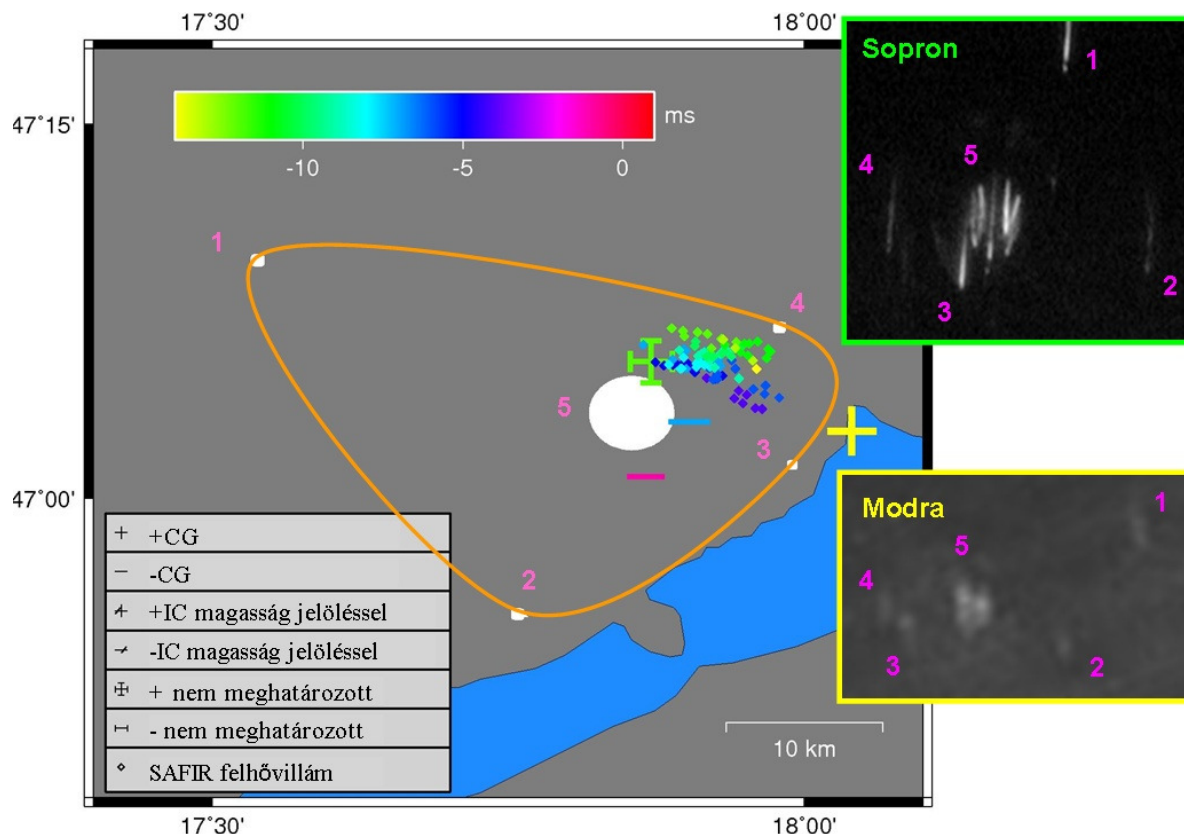
Ezek az események mindkét megfigyelőhelyhez elég közel jelentek meg, hogy a helyzetük mellett néhány esetben az emisszió vertikális tengelyének a függőlegestől való eltérését is vizsgálni tudjam. Ehhez az adott elem felső és alsó végpontjainak helyét külön határoztam meg. A helymeghatározás bizonytalanságainak figyelembevételével egy esetben

volt nyilvánvaló az elemek függőlegestől való eltérése (előző oldal, 58. ábra, 1. és 2. elemek). Itt látszólag ellentmondásos eredmény adódott, amennyiben a döntött helyzetű oszlopok alja nem a forrásvillám felé, az erővonalak várható irányában áll, hanem éppen távolabbra mutat (59. ábra). Az OMSZ VHF adatai jeleznek ugyan egy horizontálisan elnyúló kisülési csatornát, az egész struktúra azonban délebbre és keletebbre húzódik a LINET forrásvillámhoz képest. A LINET és az OMSZ adatok időpontjának egyeztetése azonban megmutatta, hogy forrásvillám előtti VHF jeleknek, azaz a forrásvillám valószínű kisülési csatornájának a megadott helye nem egyezik meg a felhő-föld kisülés LINET által meghatározott helyével. A VHF adatok közepes helymeghatározási pontossága 2-5 km a szóban forgó terület fölött, míg a LINET által közölt helyek bizonytalansága 300 m-nél kisebb. Így a LINET által megadott hely fogadható el helyesnek. A VHF források pozícióit az időbeli egyezésnek megfelelően eltolva látható, hogy a horizontálisan elnyúló kisülési csatorna az anomális irányú emissziók környékén, azok irányával párhuzamosan fut (59. ábra).



59. ábra: Csoportos vörös lidérc emisszió 2007. augusztus 10-én 22:22:55.767 (+/-10ms) UTC-kor Magyarország fölött. A háromszögelt helyzeteket oszlopok esetén fehér pontok, répa alakú lidérceknél körök jelzik. Ahol vertikális dölést próbáltam meghatározni, ott a felszíni vetület szakaszait ábrázoltam. A felfelé mutató vég pontozott. Az ábrán a LINET és a SAFIR rendszer által észlelt villámok helyét is feltüntettem. A jelmagyarázatban CG a felhő-föld (Cloud to Ground), IC a felhővillámokra (Intra/Inter-Cloud) utal. A villámjelek színe az optikai észlelés időpontjához (0 ms) viszonyított eltolódást jelöli. **A beágyazott képen** a SAFIR villámokat úgy toltam el, hogy a LINET +CG villám és a közvetlenül előtte észlelt SAFIR VHF forrás egy helyre kerüljön.

A másik vizsgált esetben egy központi, gondolócsont és oszlop alakú vörös lidércekből álló komplex központi emissziót négy oszlop alakú elem vesz körül (60. ábra). Ebben az esetben az elrendezés torzult körszimmetriája sejthető. Látható, hogy a kisülési csatornák orientációja párhuzamos a torz ellipszis hosszabbik főtengelyével. Bár a LINET és az OMSZ forráshelyek egyezése legalábbis az észlelési idők alapján itt sem tökéletes, a koordináták eltolása nem változtat a tapasztaltakon.



60. ábra: Csoportos vörös lidérc emisszió 2007. augusztus 10-én 21:51:03.753 (+/-10ms) UTC-kor Magyarország fölött. Az oszlopok háromszögelt helyzetét fehér pontok jelzik, a komplex központi emisszió helyét korong mutatja. Az ábrán a LINET és a SAFIR rendszer által észlelt villámok helyét is feltüntettem. A jelmagyarázatban CG a felhő-föld (Cloud to Ground), IC a felhővillámokra (Intra/Inter-Cloud) utal. A villámjelek színe az optikai észlelés időpontjához (0 ms) viszonyított eltolódást jelöli. A narancsszínű görbe az elrendezés torzult szimmetriáját teszi láthatóvá. **A beágyazott felvételek** az emisszió képét mutatják Sopronból, illetve Modra állomásról fényképezve. Azonos számmal ugyanazt az emissziót jelöltem.

Neubert és munkatársai megerősítették Marshall és kollégáinak hasonló következtetéseit [Marshall et al., 2007], amikor egy vörös lidérc emisszió forrásvillámának és az észlelés időpontja körüli VHF forrásoknak a relatív helyzetét elemezve rámutattak, hogy a kisülési csatorna horizontális kiterjedése hozzájárulhat az emisszió és a forrásvillám VLF/LF villámfigyelő hálózatok által megadott helyének térbeli eltolódásához [Neubert et al., 2008]. Az emisszió konfigurációját azonban egyik kutatócsoport sem vizsgálta. A bemutatott esetek arra utalnak, hogy a forrásvillám kisülési csatornájának irányultsága és a kisülés következményeként megjelenő emissziók geometriája között összefüggés áll fent. A Balaton

melletti példák alapján levont következtetések teljes mértékben alátámasztják Asano és kollégáinak horizontális szakasszal is rendelkező villámkisülések modellezéséből származó hasonló eredményeit [Asano et al., 2009b].

Összefoglalás

A dolgozat első részében ismertettem a felsőlégköri elektro-optikai emissziók fontosabb tulajdonságait, majd vázoltam a villámkisülésekhez köthető felsőlégköri optikai jelenségek kialakulásának szempontjából kiemelkedően fontos paraméternek, a forráskisülés közbeni töltésmomentum-változásnak a meghatározási lehetőségeit. Részletesen foglalkoztam a forrásvillámok extrém alacsonyfrekvenciás sugárzásának távoli észlelésén alapuló módszerrel, amely a Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálatán keresztül az intenzív villámkisülések és ezzel együtt a FEOE forráskisülések polaritásának, földrajzi helyzetének, árammomentumának és töltésmomentum-változásának meghatározására teremt lehetőséget globális lefedettséggel. Összefoglaltam a Schumann-rezonancia tranziensek fontosabb tulajdonságait, valamint a modellezésüknél alkalmazott leggyakoribb közelítéseket és matematikai eszközöket.

Bemutattam a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő Schumann-rezonancia mérőrendszert, ismertettem az adatgyűjtés és a hitelesítés menetét. A regisztrált nyers adatsorok megjelenítése céljából C++ programnyelven Windows 32 bites környezetben futó megjelenítő alkalmazást fejlesztettem.

A SRT-ek adatsorainak ismert feldolgozási módszerei közül kiválasztottam a saját méréseink sávszélességéhez leginkább illőt és az eljárás néhány lépését továbbfejlesztettem. Az egyik újítás az volt, hogy a forrás irányának a meghatározásánál a Poynting-vektor horizontális komponenseinek hodogramján egyenes helyett ellipszist illesztettem a legnagyobb hosszúságú vektorhoz és annak néhány szomszédjához tartozó pontokra. Ezáltal csak a legnagyobb jel/zaj arányhoz tartozó pontokat kellett felhasználni az iránymeghatározáshoz. Két további módosítás a forrástávolság meghatározását érintette, amelynek során a tranziensmérésből származtatott hullámimpedancia-spektrum amplitúdóit modell alapján számolt elméleti spektrumokkal kell összehasonlítani. Itt az összehasonlítás előtt az elméleti spektrumot a mért spektrum levezetésénél alkalmazott eljárással azonos módon készítettem elő, így a jelfeldolgozásból eredő torzulások mindkét függvényben ugyanúgy jelentkeztek és az összehasonlítás eredményét nem befolyásolták. Másrészt, a mért

és az elméleti görbék helyett azok gradienseit hasonlítottam össze, amelyek egyezése jellemzőbb a forrástávolságra. Végül a forráskisülés töltésmomentum-változásának meghatározásánál, amely egy exponenciális függvény analitikus Fourier-transzformáltjának az illesztését jelentette az elektromágneses tér mért térkomponenseiből levezetett árammomentum-spektrumokra, az árammomentum-spektrumok valószínűsíthetően nem természetes eredetű struktúráit kizártam az illesztésből, így jobb illeszkedést és megbízhatóbb eredményeket kaptam. A SRT idősorok analízise céljából Matlab 4.2c szoftverkörnyezetben létrehoztam egy programcsomagot, amelyben a módosított eljárás minden lépését implementáltam.

Az izraeli Mitzpe-Ramon városka mellett fekvő Schumann-rezonancia mérőállomás adatait is felhasználva megvizsgáltam, hogy a SRT-ekből levezetett forrásjellemzők közül az árammomentumot mennyire befolyásolja, hogy a SRT észlelése nappal vagy éjszaka történt, illetve hogy a forráskisülés a nappali vagy az éjszakai féltekén következett be. A kapott eredmények szerint karakterisztikus eltérés a különböző állomásokon levezetett árammomentum-spektrumok között akkor tapasztalható, ha az állomások a nappali-éjszakai terminátorvonal különböző oldalán helyezkednek el. Ilyen konfiguráció esetén, ha a forrás a nappali oldalon volt, akkor az éjszakai féltekén levő mérőállomáson a kb. 19-20 Hz alatti frekvenciatartományban átlagosan 20%-kal kisebb amplitúdók adódnak az árammomentum horizontális mágneses térkomponensből levezetett spektrumában. Ez a megfigyelés alátámasztja a háttér Schumann-rezonancia mérésekből eredő következtetést, amely szerint a nappali-éjszakai terminátorvonalon történő áthaladás 50-60 Hz alatt számottevő hatással van az elektromágneses hullámok amplitúdóira. A SRT-ekből levezetett árammomentum-spektrum amplitúdói az ezekből származtatott töltésmomentum-vátozás értéket meghatározzák, ezért a töltésmomentum-változások helyes értelmezéséhez a forrásnak és az észlelőhelynek a nappali-éjszakai terminátorvonalhoz viszonyított helyzetét figyelembe kell venni. Éjszakai féltekén levő forrás esetén a nappali oldalon levő mérőállomáson kaptam átlagosan magasabb értékeket, de csak a kb. 25 Hz fölötti frekvenciatartományon. Ez utóbbi esetben a kapott amplitúdók szórása nagyobb volt, ezért a második tapasztalat érvényességének az ellenőrzéséhez további vizsgálatok szükségesek.

A villámok által kiváltott FEOE-k forráskisüléseinek a jellemzése céljából Nyugat-Európa és a keleti mediterrán régió (Izrael környéke), valamint Afrika fölött megfigyelt vörös lidérc emissziók forráskisülésének a töltésmomentum-változását határoztam meg a dolgozat első felében tárgyalt eljárással. Az eredményeket Észak-Amerika és a Japán-tenger fölött észlelt vörös lidérc forrásvillámainak a paramétereivel összevetve megállapítottam, hogy a

három általam vizsgált terület FEOE forrásvillámainak a töltésmomentum-eloszlása és a töltésmomentumok nagyságrendje lényegében nem különbözik egymástól és összességében az észak-amerikai statisztikához áll közelebb annak ellenére, hogy a keleti mediterrán területek fölötti, FEOE-kat produkáló téli zivatarok tulajdonságai inkább a Japán-tenger fölötti zivatarokéival egyeznek meg. Ez az eredmény arra utal, hogy a vörös lidérceket életre hívó zivatarok aktuális dinamikája és egyéb, lokális tényezők hatásából eredő faktorok (pl. aeroszolkoncentráció) meghatározóbbak lehetnek az emissziók keltésének szempontjából, mint a zivatar általános struktúrájának a szerepe.

A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által, 2004 és 2008 között, bolygószerte észlelt lidércudvar típusú emissziók forráskisüléseinek a polaritását, illetve töltésmomentum-változását is meghatároztam azokban az esetekben, amikor az emisszióhoz kapcsolódó kisülés SRT-ét az optikai észlelés időpontja alapján azonosítani lehetett a Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium Schumann-rezonancia adatsoraiban. Megállapítottam, hogy lidércudvarok nagyobb részét (81 %-át) negatív polaritású villámkisülés idézte elő és ilyen polaritású forrásvillám esetén ez az emissziótípus inkább nyílt vízfelület, illetve főleg kontinentális partvonalak fölött jön létre, mint szárazföld fölött. Ezzel megmutattam, hogy csak az Észak-Amerika fölötti megfigyelések alapján levont ugyanilyen következtetések globálisan is igazak. Ezen túlmenően az eredmények szerint a pozitív polaritású lidércudvarok viszont éppen a partvidékek mentén ritkábbak és a szárazföldek, illetve nyílt vízfelület fölött egyforma valószínűséggel fordulnak elő.

Számos, az elemzésbe bevont lidércudvar esetében az emisszió abszolút fényességét is meghatározták. A forrásvillám töltésmomentum-változása és a kisülés által kiváltott optikai jelenség fényessége között polaritástól függetlenül gyenge pozitív korrelációt tapasztaltam, ami arra utal, hogy a jelenség fényességének mértékét nem kizárólag a forráskisülés töltésmomentum-változásával összefüggő hatások befolyásolják. A lidércudvarok fényességét meghatározó további faktorok azonosítása további vizsgálatokat igényel.

2007-ben korábbi FEOE megfigyelési kampányok tapasztalatai alapján egy optikai észlelőrendszert állítottam össze, amely segítségével Sopron kb. 600 km-es körzetében villámkisülések által kiváltott felsőlégköri emissziókat, főleg vörös lidérceket és néhány lidércudvart figyeltem meg. A kamera pozicionálását végző motorizált mechanika vezérléséhez C++ nyelven Windows 32 bit-es környezetben futó konzolalkalmazást fejlesztettem.

A 2007 és 2009 között folytatott közép-európai megfigyelések során több olyan FEOE-val is találkoztam, amely formája nem volt besorolható egyik korábban leírt alaki

csoportba sem. Ezek többsége mégis legalább részben reprezentálta egy (vagy több) jól definiált emisszió típus (legtöbbször répa alakú vörös lidérc) valamely részét és a jelenség időbeli lefolyása is arra utalt, hogy lényegében egy ismert felsőlégköri kisüléstípus csonka vagy torzult alakját látom. 2009. augusztus 2-án egy olyan emissziót figyeltem meg, amely több szempontból sem illeszkedett egyik korábban leírt FEOE kategóriába sem, ezért új típusú emisszióként vettem számba és a „trollók nyilának” neveztem el.

Az optikai észleléseket az Európában nemrégiben létesített LINET villámfigyelő-hálózat adataival és a Széchenyi István Geofizikai Observatórium Schumann-rezonancia adatsoraival összevetve azonosítottam a 2007-ben észlelt emissziók forrásvillámait. A felsőlégköri kisülések megjelenésének forrásvillámuktól számított időeltolódását vizsgálva megállapítottam, hogy az időeltolódások három csoportba sorolhatók: rövid időeltolódások 30 ms alatt, közepes időeltolódások 30 ms és kb. 100-110 ms között és a hosszú időeltolódások 100-110 ms fölött. A leggyakrabban rövid, 10 ms körüli időeltolódásokkal találkoztam, ami a nyugat-európai és az amerikai kontinens fölött a nyári időszakban megfigyelt emissziók esetében tapasztaltakkal egyezik meg, ugyanakkor különbözik a kelet-mediterrán területeken és Japán környékén levezetett téli, jellemzően hosszabb értékektől.

Az időeltolódásokat az emissziók típusa, vörös lidérceknél alak és számosság (magányos vagy csoportos megjelenés) szerint is vizsgálva több megállapítást tudtam tenni: (i) a lidércudvarok a keltővillámukat minimális időeltolódással követik. Itt a felvételek 20 ms-os expozíciós ideje nem tette lehetővé az időeltolódás pontosabb meghatározását, ennek ellenére ez a tapasztalat nem különbözik más lidércudvar észleléseknél találtakkal. (ii) az alaktól függetlenül a magányosan megjelenő lidérceknél nem tapasztaltam jellemző időeltolódást, ellenben (iii) csoportos megjelenés esetén a kizárólag oszlop alakú elemeket tartalmazó emissziók időeltolódása karakterisztikusan 30 ms alá esett. Ezek a tapasztalatok a répa és az oszlop alakú megjelenéseket összességében nézve statisztikailag alátámasztják azokat a korábbi megfigyeléseket, amelyek szerint a répa alakú vörös lidércek időeltolódása a keltővillámuktól átlagosan hosszabb, mint az oszlop alakú vörös lidérceké.

Az időeltolódásoknak a keltővillám csúcsáramával való összefüggését vizsgálva azt találtam, hogy a közép-európai FEOE-k ebből a szempontból nem különböznek a Föld más pontjain megfigyelt társaiktól, nevezetesen a hosszú időeltolódások (>100 ms) csak viszonylag kisebb csúcsáramértékek (<50 kA) esetén fordultak elő, illetve a különösen nagy csúcsáramértékeknél (>100 kA) a vörös lidércek időeltolódása legfeljebb közepes volt ($< \sim 60$ ms).

A kb. 110 kA-nél nagyobb csúcsáramú villámkisülések jellemzően (de nem feltétlenül) lidércudvar megjelenését (is) kiváltották. Ez a megfigyelés alátámasztja a lidércudvarokat kiváltó villámkisülések áramára vonatkozó, műholdas fényességmérések alapján levont következtetést, miszerint ennek a jelenségtípusnak a létrejöttéhez gyorsan kialakuló, ugyanakkor tekintélyes amplitúdójú kvázi-stacionárius tér szükséges a mezoszférában.

A közép-európai FEOE-ket előidéző villámkisülések csúcsáramait összehasonlítottam az emissziókat ki nem váltó kisülések csúcsáramának eloszlásával, és több hasonló vizsgálat eredményével egybevetve következtetésként azt találtam, hogy ebben a régióban is a felsőléggő emissziók jellemzően átlagon felüli csúcsáramértékek esetén fordulnak elő, azonban a forrásvillám csúcsáramának nagysága önmagában nem meghatározó paramétere az emisszió megjelenésének.

A 2007-ben észlelt közép-európai FEOE-k közül 8 forráskisülése felhővillám volt. A LINET felhővillámok esetében becslést ad a kisülés magasságára is, így össze tudtam vetni a FEOE-kat nem keltő felhővillámok magasságát az emissziókhoz kapcsolhatókéval. A kis eseményszámra való tekintettel azt tudtam megállapítani, hogy az emissziókat keltő villámkisülések nem a zivatarfelhő alsó tartományában következtek be. Kvantitatív következtetések levonásához több felsőléggő kisüléshez kapcsolható felhővillámra, valamint kalibrált villámmagasság-értékekre lett volna szükség.

2007 júliusában és augusztusában szlovák kollégákkal közösen 23 vörös lidérc típusú FEOE-t egyidejűleg észleltünk Sopronból, illetve Szlovákiából, Modra mellől. A párhuzamos optikai megfigyelés lehetővé tette, hogy ezeknek az eseményeknek a földrajzi helyét és magasságát háromszögelés segítségével határozzam meg. A pontos hely ismeretében vizsgáltam az emissziók és a forrásvillámok horizontális eltolódását. Azt találtam, hogy az emissziók jellemzően eltolódva jelennek meg a forrásvillám LINET által szolgáltatott helyéhez képest. Oszlop alakú vörös lidércек esetén leggyakrabban 10-15 km-es eltolódást találtam, míg répa alakú lidércекnél az eltolódás eloszlásában két csúcs jelent meg 5-10 km-nél és 25-30 km-nél. Különösen az oszlop alakú emissziók esetében a tapasztalt eltolódás jó egyezésben áll amerikai észleléseknél tapasztalt értékekkel.

A különböző típusú vörös lidércек által elfoglalt magasságtartományt illetően több következtetést is le lehetett vonni. (i) Az ugyanazon villámkisülés után megjelenő oszlop alakú vörös lidércек által elfoglalt magasságtartomány a mérések hibahatárán belül azonos. (ii) Az oszlop alakú vörös lidércек hossza és magassága a különböző esetekben a 65-86 (+/- 2 km) km-es magasságtartományban jelentősen változik. (iii) A répa alakú vörös lidércек

központi, legfényesebb tartománya az oszlop alakú lidércekhez képest jellemzően alacsonyabban jelent meg. Az ilyen típusú emissziók törzsének közepe kis eltéréssel 70 km-es magasságban található és a törzs e fölé, illetve alá is többnyire szimmetrikusan nyúlik. A központi rész hossza valamivel kisebb változékonyságot mutat, mint oszlop alak esetében: többségük 9-16 km-es. Az oszlop és a répa alakú vörös lidércek által elfoglalt magasságtartomány itt tapasztalt különbsége alátámasztja észak-amerikai megfigyelések során készült nagyobb időfelbontású felvételek alapján végzett háromszögelések eredményeiből származó következtetéseket. (iv) A répa alakú vörös lidércek legfelső, diffúz részének legnagyobb magassága a répatest hosszától függetlenül elég stabilan 86 km és 89 km között található. (v) A répa alakú vörös lidérceknél viszonylag gyakrabban (de ott sem mindig) megfigyelhető „gyökérzet” oszlop alakú lidércek esetén ritkán észlelhető. A háromszögelt események között megfigyelt legmélyebb szálas struktúra 45.5 km-ig (+/- kb. 2 km) ért le.

Az észlelőhelyekhez közelebb, csoportban megjelenő vörös lidércek esetében lehetőség volt a csoport tagjainak egyenkénti háromszögelésére, az elemek függőleges tengelydőlésének és az emissziók geometriai elrendeződésének a vizsgálatára. Magyarországon fölött, a Balaton keleti végének közelében észlelt emisszióknál az elemek elrendeződésének a villámok kisülési csatornájához viszonyított elhelyezkedését is elemezhettem az Országos Meteorológiai Szolgálat SAFIR villámészlelő-rendszeréből származó adatok segítségével. Azt találtam, hogy a vörös lidércek körszimmetriát, vagy annak még felismerhető mértékben torzult változatát mutató konfigurációjának előfordulása ritkább, mint a látszólag véletlenszerű elemelrendezés. Másrészt, a forráskisülés kisülési csatornájának orientációja hasonlóságot mutat némely esetben az elemek dőlésének irányával, torzult csoportnál a szimmetriatengely elmozdulásának irányával, illetve a csoport egészének a forráskisüléshez viszonyított eltolódási irányával. Ez a megfigyelés megerősíti azokat a modellezési eredményeket, amelyek szerint a forrásvillám kisülési csatornájának irányultsága és a kisülés következményeként megjelenő emissziók geometriája között összefüggés áll fent. Az eredmény alátámasztja azokat a korábbi megfigyeléseket is, amelyek szerint a felhővillámoknak az emissziók forráskisülésüktől való horizontális eltolódásában jelentős szerepük lehet.

A tárgyalt témák további vizsgálatának néhány lehetséges iránya

A dolgozatban a SRT-eket főleg a FEOE-k forrásvillámainak a tanulmányozása céljából vizsgáltam. A nappali-éjszakai terminátorvonal hatásával kapcsolatos elemzés azonban jó szemlélteti, hogy ezeknek a jelenségeknek a hosszútávú megfigyelésével a Föld-ionoszféra hullámvezető szerkezetének és elektromágneses tulajdonságainak a részletesebb megismerése is lehetséges. A nappali-éjszakai terminátorvonalnak az alacsonyfrekvenciás elektromágneses hullámokra gyakorolt közvetlen hatását az értekezésben a naplementével kapcsolatban sikerült kimutatni. Az effektus frekvenciafüggésének pontosabb tanulmányozásához, illetve a napfelkeltekor várható változásokkal való összehasonlításához több SRT bevonása és további vizsgálat szükséges. A SRT-k segítségével a hullámvezető más (pl. poláris) inhomogenitásának hatása, illetve az effektusok időbeli változásának elemzése a háttér SR méréseknél nagyobb időfelbontással megvalósítható [Mitchell, 1976; Sentman, 1989].

A dolgozatban tárgyalt témákban a SRT forrásvillámok globális helymeghatározásának pontossága nem játszott elsődleges szerepet. A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő SR mérőrendszer SRT észlelési határfokának, valamint a helymeghatározás abszolút pontosságának a felmérése nemcsak a mérőállomás elektromágneses környezetének megismerését szolgálja [Füllekrug és Sukhorukov, 1999], hanem segít helyesen értelmezni az egyedi, intenzív villámkisülések eloszlásának és a globális zivatar-tevékenység SR háttér-mérésekből származó jellemzőinek összehasonlítását is.

A Közép-Európában folytatott saját FEOE megfigyelések közül a dolgozatban a 2007-es észlelések alapján levont néhány következtetést ismerttettem. Az adatok elemzése azonban még távolról sem teljes, például a FEOE-ket produkáló zivatarcellák és konvektív rendszerek villámaktivitásának és meteorológiai tulajdonságainak időbeli változását a felsőlégköri emissziók kialakulásának időpontjaival összevetve a jelenségek keletkezéséhez szükséges további környezeti paraméterek felmérése lehetséges [Neubert et al., 2008]. A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő VLF mérések FEOE kutatásban való felhasználása is kiknázásra vár.

Az előbbieken említett, jelenleg is elérhető adatok mellett a mérőrendszer fejlesztésével további információ nyerhető. A kameránk kalibrálásával például kvantitatív fényességértékeket rendelhetünk az emissziókhoz. Egy nagyobb sebességű, érzékeny kamerával a jelenségek kialakulásának részleteit nagyobb időfelbontásban láthatnánk, további

kamerák alkalmazásával egyszerre nagyobb területet, illetve akár több zivatargócot lehetne megfigyelni.

A fentiekben felsorolt ötletek a SRT-ekkel és a FEOE-kkal kapcsolatos további kutatások lehetséges irányainak csak egy kisebb részhalmazát adják az értekezésben is említett, megválaszolásra váró néhány kérdés mellett. Ezek a kérdések bizonyítják, hogy mindkét, intenzív villámkisülésekhez társuló jelenség tanulmányozásával további értékes információk nyerhetők globális és regionális környezetünkről, valamint ez ebben zajló folyamatok közötti összefüggésekről.

További köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a következő személyeknek a dolgozatban ismertetett munkák és fejlesztések kivitelezése közben készségesen nyújtott szakmai segítségért és tapasztalataik megosztásáért:

Hans-Dieter Betz, Olivier Chanrion, Dombai Ferenc, Michal Ganot, Eran Greenberg, Walter Lyons, Torsten Neubert, Colin Price, Dave Sentman, Juraj Toth, Varga Bálint, Oscar van der Velde, Earle Williams, Yoav Yair és Roy Yaniv.

Köszönet illeti a Magyar Tudományos Akadémia Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézetét a szakmai kutatásaimhoz szükséges háttér biztosításáért. Külön köszönetet szeretnék mondani Németh Erzsébetnek, Tóth Mártának, Palla Gyulának, Molnár Tibornak és Hatos Gábornak a könyvtárazással, az anyagi források kezelésével, a szerelési munkákkal és a számítástechnikát érintő kérdésekkel kapcsolatos segítségükért. A dolgozat eredményeinek a megszületését az OTKA (T-034039, TS-40848, NI-61013, K-72474) és a Magyar Űrkutatási Iroda pályázati támogatásai segítették.

A nemzetközi együttműködések kialakítását és a határokon túli tapasztalatszerzést az European Cooperation in Science and Technology (COST) „A villámkisülés fizikája és hatásai” (The Physics of Lightning Flash and Its Effects) c. P18-as számú akciója segítette.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni minden barátomnak és kollégámnak mindazt a támogatást, amely akármilyen módon is megkönnyítette a munkám és így hozzájárult ennek a dolgozatnak az elkészüléséhez.

Ábrák jegyzéke

1. ábra: A Wilson-diagram.....	11
2. ábra: Felsőléggőri elektro-optikai emissziók ismert típusai	11
3. ábra: Vörös lidércek spektrumai.....	13
4. ábra: FEOE-k globális előfordulása	15
5. ábra: Felhő-föld villámkisülés fő szakaszai.	25
6. ábra: VLF atmoszferik ELF lomha véggel és anélkül.....	26
7. ábra: Modellezett ELF impulzusok amplitúdóspektrumai különböző forrás-észlelő távolságoknál.	28
8. ábra: Elektromágneses állóhullámok kialakulása a földfelszín és az ionoszféra alsó határa között.....	29
9. ábra: Vertikális elektromos térkomponens energiaspektruma a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban	30
10. ábra: Természetes eredetű elektromágneses jelek a Széchenyi István Geofizikai Observatórium Schumann-rezonancia méréseiben	31
11. ábra: Gömbi koordináta-rendszer vertikális elektromos dipólusforrás elektromágneses terének leírásához.....	35
12. ábra: Az első négy TEM rezgési módus amplitúdóeloszlása tökéletes gömbhéj alakú hullámvezetőben.....	38
13. ábra: A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer	47
14. ábra: A Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer jelátviteli karakterisztikái.....	50
15. ábra: A nyers SR adatokat megjelenítő szoftver.	51
16. ábra: Kvázi-folytonos, vasúti eredetű zavarok a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR mérőrendszer adatsoraiban.	53

17. ábra: Valószínűsíthetően természetes eredetű elektromos zavarok és mesterséges eredetű mágneses impulzuspárok a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban működő SR mérőrendszer adatsoraiban	54
18. ábra: A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumtól azonos irányokban és egyenlő távolságokra elhelyezkedő pontok helyei a Földön.	56
19. ábra: SRT adatsorok kiválasztása / ablakozása a további feldolgozáshoz.....	59
20. ábra: A forrás irányának meghatározása.....	62
21. ábra: Áramimpulzus-forrás vertikális elektromos, horizontális mágneses és komplex impedancia modellspektrumai különböző forrás-észlelő távolságoknál	66
22. ábra: Mért és modellezett hullámimpedancia-spektrumok hasonlósága	68
23. ábra: Az adatfeldolgozás szemléltetésénél alkalmazott SRT forrásának levezett földrajzi helye	68
24. ábra: Az adatfeldolgozás szemléltetésénél alkalmazott SRT mért és a meghatározott forrás-észlelő távolsághoz tartozó modell térkomponens-spektrumai, valamint az ezek hányadosából levezetett forrás árammomentum-spektrumok.	70
25. ábra: SRT töltésmomentumának meghatározása az árammomentum-spektrumából függvényillesztéssel.....	73
26. ábra: NCK és MR állomáson rögzített adatsorok időbeli illesztése közösen regisztrált SRT-ek szekvenciái alapján.....	78
27. ábra: SRT forráshelyének és árammomentum-spektrumának meghatározása nappali ionoszféra alatti észlelésekből NCK és MR állomáson.....	79
28. ábra: SRT forráshelyének és árammomentum-spektrumának meghatározása éjszakai ionoszféra alatti észlelésekből NCK és MR állomáson.....	80
29. ábra: Nappali ionoszféra alatti forrás nappali és éjszakai ionoszféra alatti észlelésekből levezetett árammomentum-spektrumainak összehasonlítása	83
30. ábra: Éjszakai ionoszféra alatti forrás nappali és éjszakai ionoszféra alatti észlelésekből levezetett árammomentum-spektrumainak összehasonlítása	84
31. ábra: Nappali és éjszakai ionoszféra alatti észlelésekből levezetett árammomentum-spektrumok arányainak összehasonlítása	85

32. ábra: Nyári, illetve téli zivatarfelhőkben uralkodó jellemző töltéseloszlás és hőmérsékleti szintek	88
33. ábra: Különböző kontinensek és régiók fölött megfigyelt vörös lidércek forrásvillámainak töltésmomentum-változásai	89
34. ábra: Közép-Afrikában megfigyelt optikai emissziók forrásvillámainak különböző ELF mérőállomások adataiból levezetett töltésmomentum-változásai	91
35. ábra: A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által észlelt és a dolgozatban vizsgált lidércudvarok észlelési helyei és polaritása	93
36. ábra: A FORMOSAT-2 műhold ISUAL megfigyelőegysége által észlelt lidércudvarok dolgozatban vizsgált részhalmazában a fényesség és a forráskisülés töltésmomentum-változásának összefüggése, valamint a töltésmomentum-értékek eloszlása	94
37. ábra: Watec 902H2 Ultimate kamera CCD chipjének kvantumhatásfok görbéje.....	98
38. ábra: A soproni hordozható felsőlégköri optikai megfigyelőrendszer részei.....	99
39. ábra: A soproni rögzített felsőlégköri optikai megfigyelőrendszer részei és észlelési tartománya	100
40. ábra: Egy LINET által szolgáltatott villámtérkép 2008-ból.....	102
41. ábra: Néhány a Sopronból 2007 nyarán észlelt FEOE-k közül.....	105
42. ábra: Sopronból észlelt kék nyaláb (vagy törpe) emisszió.....	107
43. ábra: Sopronból észlelt komplex emissziósorozat a „trollok nyilával”	109
44. ábra: TROLL Észak-Amerikában.....	110
45. ábra: A troll és a trollok nyilának morfológiai összehasonlítása.....	111
46. ábra: Sopronból 2007 nyarán megfigyelt FEOE-khez kapcsolható villámkisülések, a megfigyelt terület és a LINET állomások helyei	112
47. ábra: Sopronból 2007 nyarán megfigyelt FEOE-k megjelenése és az ezeket keltő villámkisülések közötti időeltolódás a kisülés csúcscsúcsának függvényében.....	114
48. ábra: Sopronból 2007 nyarán megfigyelt különböző alakú vörös lidércek megjelenése és az ezeket keltő villámkisülések közötti időeltolódás.	116

49. ábra: FEOE-khez kapcsolható, illetve nem kapcsolható, LINET által észlelt villámkisülések csúcsáramérték-eloszlása Közép-Európában a 2007-es soproni észlelések alapján	118
50. ábra: FEOE-khez kapcsolható, illetve nem kapcsolható, LINET által észlelt felhővillámok magasságának eloszlása Közép-Európában a 2007-es soproni észlelések alapján	122
51. ábra: Sopron és Modra (AGO) állomások észlelési tartományai	125
52. ábra: Sopron és Modra állomások észleléseinek különböző képfelbontását szemléltető felvételek.....	126
53. ábra: Sopronból és Modra állomásról egyidejűleg észlelt répa alakú vörös lidérc helyének és magasságának háromszögelése.	127
54. ábra: Pont helymeghatározási bizonytalansága háromszögelés esetén azokban a tartományokban, amelyek fölött Sopron és Modra állomásokon egyidejűleg észleltek vörös lidérceket 2007. nyarán.....	129
55. ábra: Nem besorolt alakú vörös lidércek egyidejű felvételei Sopronból és Modra állomásról.....	130
56. ábra: 2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én Közép-Európa fölött megjelent vörös lidércek által elfoglalt magasságtartományok	130
57. ábra: 2007. július 21-én, 23-án és augusztus 10-én Közép-Európa fölött megjelent vörös lidércek és emissziócsoportok horizontális eltolódásai a forráskisülésüktől.	132
58. ábra: Magyarország fölött Sopronból és Modra állomásról fényképezett csoportos vörös lidérc emisszió elemeinek konfigurációja 2007. augusztus 10.-én 22:22:55.767 (+/-10ms) UTC-kor.....	135
59. ábra: Magyarország fölött Sopronból és Modra állomásról fényképezett csoportos vörös lidérc emisszió elemeinek forrásvillámukhoz és a kisülési csatornákhöz viszonyított helyzete 2007. augusztus 10.-én 22:22:55.767 (+/-10ms).....	136
60. ábra: Magyarország fölött Sopronból és Modra állomásról fényképezett csoportos vörös lidérc emisszió elemeinek konfigurációja és az emisszió elemeinek forrásvillámukhoz, valamint a kisülési csatornákhöz viszonyított helyzete 2007. augusztus 10-én 21:51:03.753 (+/-10ms) UTC-kor	137

Irodalomjegyzék

- Adachi et al., 2009, Adachi, T., S. Cummer, J. Li, N. Lehtinen, Y. Takahashi, R. Hsu, H. Su, A. Chen, S. B. Mende, H. U. Frey, *Current moment waveforms in sprite/halo producing lightning derived from satellite optical measurements*, American Geophysical Union 2009 Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, abstract #AE33A-0287, 2009
- Appleton et al., 1926, Appleton, E. V.; Watson Watt, R. A.; Herd, J. F, *On the Nature of Atmospherics part II*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Volume 111, Issue 759, pp. 615-653, 1926
- Arnone et al., 2008, Enrico Arnone, Peter Berg, Fredrik Boberg, József Bór, Olivier Chanrion, Carl-Fredrik Enell, Massimiliano Ignaccolo, Ágnes Mika, Anna Odzimek, Oscar van der Velde, Thomas Farges, Steen Laursen, Torsten Neubert and Gabriella Satori, *The Eurosprite 2005 campaign*, Proceedings of the 33rd Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods , Kiruna, Sweden, 28 August - 1 September 2006, IRF Scientific Report 292, 29-40, ISSN 0284-1703, ISBN 978-91-977255-1-4, 2008, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden
- Arnone et al., 2009, Arnone, E.; Kero, A.; Enell, C.-F.; Carlotti, M.; Rodger, Craig J.; Papandrea, E.; Arnold, N. F.; Dinelli, B. M.; Ridolfi, M.; Turunen, E., *Seeking sprite-induced signatures in remotely sensed middle atmosphere NO₂: latitude and time variations*, Plasma Sources Science and Technology, Volume 18, Issue 3, pp. 034014, (2009), DOI: 10.1088/0963-0252/18/3/034014
- Asano et al., 2009a, Asano, T., T. Suzuki, Y. Hiraki, E. Mareev, M. G. Cho, and M. Hayakawa, *Computer simulations on sprite initiation for realistic lightning models with higher-frequency surges*, J. Geophys. Res., 114, A02310, (2009), doi:10.1029/2008JA013651.
- Asano et al., 2009b, T.Asano, T.Suzuki, M.Hayakawa, M.G.Cho, *Three-dimensional EM computer simulation on sprite initiation above a horizontal lightning discharge*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71, (2009), pp. 983–990, doi:10.1016/j.jastp.2009.04.003
- Ádám és Bencze, 1963, Ádám A., Bencze P., *Kisfrekvenciás természetes elektromágneses energiaforrás vizsgálata*, (in Hungarian), Magyar Geofizika, IV, 1-2, pp.29-35, 1963
- Ádám et al., 2009, A. Ádám, P. Bencze, J. Bór, B. Heilig, Á. Kis, A. Koppán, K. Kovács, I. Lemperger, F. Márcz, D. Martini, A. Novák, G. Satori, S. Szalai, L. Szarka, J. Verő, V. Wesztergom, B. Zieger, *Geoelectromagnetism and the changing Earth*, Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Akadémiai Kiadó, ISSN 1217-8977 (Print) 1587-1037 (Online), Volume 44, Number 3/September 2009, DOI 10.1556/AGeod.44.2009.3.3, pp. 271-312
- Barrington-Leigh és Inan, 1999, Barrington-Leigh, C. P., and U. S. Inan, *Elves triggered by positive and negative lightning discharges*, Geophys. Res. Lett., 26(6), pp. 683–686, (1999), doi:10.1029/1999GL900059.

- Barrington-Leigh et al., 1999, Barrington-Leigh, C. P., U. S. Inan, M. Stanley, and S. A. Cummer, *Sprites triggered by negative lightning discharges*, Geophys. Res. Lett., 26(24), pp. 3605–3608, (1999), doi:10.1029/1999GL010692.
- Barrington-Leigh et al., 2001, Barrington-Leigh, C. P., U. S. Inan, and M. Stanley, *Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry*, J. Geophys. Res., 106, A2, pp.1741–1750, (2001), doi:10.1029/2000JA000073.
- Bell et al., 1998, Bell, T. F., S. C. Reising, and U. S. Inan, *Intense continuing currents following positive cloud-to-ground lightning associated with red sprites*, Geophys. Res. Lett., 25(8), 1285–1288, (1998), doi:10.1029/98GL00734.
- Belyaev et al., 1999, G. G. Belyaev, A. Yu Schekotov, A. V. Shvets and A. P. Nickolaenko, *Schumann resonances observed using Poynting vector spectra*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 61, Issue 10, July 1999, Pages 751-763, doi:10.1016/S1364-6826(99)00027-9
- Bencze et al., 1982, Bencze Pál, Major György, Mészáros Ernő , *Fizikai Meteorológia*, Akadémiai kiadó, Budapest, 1982
- Berger et al., 1975, Berger, K., R. B. Anderson, and H. Kroninger, *Parameters of lightning flashes*, Electra, 1975, 80, 223– 237.
- Bering et al., 2004, E. A. Bering, L. Bhusal, J. R. Benbrook, J. A. Garrett, A. P. Jackson, E. M. Wescott, D. R. Moudry, D. D. Sentman, H. C. Stenbaek-Nielsen and W. A. Lyons, *The results from the 1999 sprites balloon campaign*, Advances in Space Research, Volume 34, Issue 8, 2004, Pages 1782-1791, doi:10.1016/j.asr.2003.05.043
- Betz et al., 2009, Betz, H.-D., K. Schmidt, and W. P. Oettinger, *LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe*, in: Lightning: Principles, Instruments and Applications, Eds. H.-D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Springer Science+Business Media B.V., 2009, ISBN: 978-1-4020-9078-3, Chapter 5, pp. 115-140, doi:10.1007/978-1-4020-9079-0_5
- Boccippio et al., 1995, D.J. Boccippio, E.R. Williams, S.J. Heckman, W.A. Lyons, I.T. Baker and R. Boldi, *ELF transients and positive ground strokes*, Science 269, (1995), pp. 1088–1091.
- Boccippio et al., 1998, Boccippio, D. J., Wong, C., Williams, E. R., Boldi, R., Christian, H. J., and Goodman, S. J.: *Global validation of single-station Schumann resonance lightning location*, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 60, pp. 701–712, 1998.
- Bone, 2007, Neil Bone, *Aurora: observing and recording nature's spectacular light show*, Patrick Moore's practical astronomy series, Practical Astronomy, illusztrált, 182 p., Springer, 2007

- Bór et al., 2009, Bór, J., Satori, G. and Betz, H-D., *Observation of TLEs in Central Europe from Hungary Supported by LINET*, in Norma B. Crosby, Tai-Yin Huang, Michael J. Rycroft, *Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near-Earth Space: Proceedings of the Workshop Corte (France), 23-27 June 2008*, AIP Conference Proceedings Volume 1118, pp. 73-83, ISBN: 978-0-7354-0657-5, ISSN: 0094-243X, doi:10.1063/1.3137716, 2009
- Bruce és Golde, 1941, C.E.R. Bruce and R.H. Golde, *The Lightning. Discharge*, The Journal of Institution of Electrical. Engineers, Vol.88, No.6, Part II. pp.487-505, 1941.
- Burke és Jones, 1992, Burke, C.P., and Jones, D.L., *An experimental investigation of ELF attenuation rates in the Earth-ionosphere duct.*, J. Atmos. Terr. Phys. 54: 243-50., 1992
- Burke és Jones, 1996, C.P. Burke and D. Llanwyn Jones, *On the polarity and continuous currents in unusually large lightning flashes deduced from ELF events*, J. Atmos. Terr. Phys., 58, (1996), pp. 531–540.
- Chalmers, 1967, J. A. Chalmers, *Atmospheric Electricity*, 2nd ed. Pergamon, London, 515 pp., 1967.
- Chapman et al., 1966, Chapman , F. W., D. Llanwyn Jones, J. D. W. Todd, and R. A. Challinor, *Observation on the propagation constant of the Earth-ionosphere Waveguide in the frequency band 8 kc/s to 16 kc/s*, Radio Science, 1(11), 1273, (1966)
- Chen et al., 2008, Chen, Alfred B.; Kuo, Cheng-Ling; Lee, Yi-Jen; Su, Han-Tzong; Hsu, Rue-Ron; Chern, Jyh-Long; Frey, Harald U.; Mende, Stephen B.; Takahashi, Yukihiro; Fukunishi, Hiroshi; Chang, Yeou-Shin; Liu, Tie-Yue; Lee, Lou-Chuang, *Global distributions and occurrence rates of transient luminous events*, J. Geophys. Res., 113, A08306, (2008), doi:10.1029/2008JA013101.
- Christian et al., 2003, H.J. Christian, R.J. Blakeslee, D. Boccippio, W.L. Boeck, D. Buechler, K. Driscoll, S.J. Goodman, J. Hall, D. Mach and M.F. Stewart, *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector*, Journal of Geophysical Research 108(D1), (2003), pp. 4005–4019.
- Cummer, 1997, Steven Andrew Cummer, *Lightning and Ionospheric Remote Sensing Using VLF/ELF Radio Atmospherics*, PhD thesis, Stanford University VLF Group, 1997, <http://www-star.stanford.edu/~vlf/publications/theses/cummerthesis.pdf>
- Cummer és Inan, 1997, Cummer, S. A. and U. S. Inan, *Measurement of charge transfer in sprite-producing lightning using ELF radio atmospherics*, Geophysical Research Letters, v. 24, p. 1731, 1997.
- Cummer et al., 1998, Cummer, S. A., U. S. Inan, T. F. Bell, and C. P. Barrington-Leigh, *ELF radiation produced by electrical currents in sprites*, Geophysical Research Letters, v. 25, p. 1281, 1998.
- Cummer és Inan, 2000, Cummer, S. A., and U. S. Inan, *Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations*, Radio Science, v. 35, p. 385, 2000.

- Cummer, 2003, Cummer, S. A., *Current moment in sprite-producing lightning*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 65, p. 499, 2003.
- Cummer és Lyons, 2005, Cummer, S. A., and W. A. Lyons, *Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation*, J. Geophys. Res., 110, A04304, (2005), doi:10.1029/2004JA010812.
- Cummer, 2006, Steven A. Cummer, *Measurements of Lightning Parameters from Remote Electromagnetic Fields*, in: Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, edited by: Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., vol. 225 of NATO Science Series II. Mathematics, physics and chemistry, pp. 191–210, Springer Verlag, ISBN 978-1-4020-4627-8, 2006, doi:10.1007/1-4020-4629-4_9
- Cummer et al., 2009, Cummer, S. A., J. Li, F. Han, G. Lu, N. Jaugey, W. A. Lyons and T. E. Nelson, *Quantification of the troposphere-to-ionosphere charge transfer in a gigantic jet*, Nature Geoscience, 2, 617 – 620, (2009), doi 10.1038/ngeo607
- Cummins et al., 1998, Cummins, K., M. Murphy, E. Bardo, W. Hiscox, R. Pyle, and A. Pifer, *A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network*, Journal of Geophysical Research, 103(D8), pp. 9035-9044, 1998
- Dombai, 2008, Ferenc Dombai, *Attempts to enhance the localization accuracy and to monitor the reliability of the SAFIR HMS lightning localization system*, Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service, Vol. 112, No. 1, January–March 2008, pp. 15–31
- Enell et al., 2008, Enell, C.-F.; Arnone, E.; Adachi, T.; Chanrion, O.; Verronen, P. T.; Seppälä, A.; Neubert, T.; Ulich, T.; Turunen, E.; Takahashi, Y.; Hsu, R.-R., *Parameterisation of the chemical effect of sprites in the middle atmosphere*, Annales Geophysicae, Volume 26, Issue 1, 2008, pp.13-27,
- Farges és Blanc, 2010, Farges, T., and E. Blanc, *Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas*, J. Geophys. Res., 115, A00E31, 2010, doi:10.1029/2009JA014700.
- Fitzgibbon et al., 1999, Fitzgibbon, Andrew; Maurizio Pilu, Robert B. Fisher, *Direct Least Square Fitting of Ellipses*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 21, no. 5, pp. 476-480, May, 1999, doi:10.1109/34.765658
- Franz et al., 1990, Franz, R. C., Nemzek R. J. and Winckler, J. R., *Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System*, Science 249, pp. 48-51., 1990
- Frey et al., 2007, Frey, H. U., S. B. Mende, S. A. Cummer, J. Li, T. Adachi, H. Fukunishi, Y. Takahashi, A. B. Chen, R.-R. Hsu, H.-T. Su, and Y. S. Chang, *Halos generated by negative cloud-to-ground lightning*, Geophys. Res. Lett., 34, L18801, (2007), doi:10.1029/2007GL030908.

- Fukunishi et al., 1996, Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, and W. A. Lyons, *Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere*, Geophys. Res. Lett., 23(16), pp. 2157–2160, (1996), doi:10.1029/96GL01979.
- Fukunishi et al., 2002, Fukunishi, H.; Watanabe, Y.; Uchida, A.; Takahashi, Y., *Spatial and Temporal Structures of Sprites and Elves Observed by Array Photometers*, in Space Weather Study Using Multipoint Techniques, Proceedings of the COSPAR Colloquium held in Pacific Green Bay, Wanli, Taipei, Taiwan, 27-29 September, 2000. Edited by Ling-Hsiao Lyu. Pergamon Press, 2002., p.283
- Füllekrug és Riesing, 1998, Füllekrug, M. and Riesing, S.C., *Excitation of Earth-ionosphere cavity resonances by sprite-associated lightning flashes*, Geophysical Research Letters 22, pp. 4145–4148., 1998.
- Füllekrug és Sukhorukov, 1999, Füllekrug, M., and A. I. Sukhorukov, *The contribution of anisotropic conductivity in the ionosphere to lightning flash bearing deviations in the ELF/ULF range*, Geophys. Res. Lett., 26(8), 1109–1112, (1999), doi:10.1029/1999GL900174.
- Ganot et al., 2007, Ganot, M., Y. Yair, C. Price, B. Ziv, Y. Sherez, E. Greenberg, A. Devir, and R. Yaniv, *First detection of transient luminous events associated with winter thunderstorms in the eastern Mediterranean*, Geophys. Res. Lett., 34, L12801, (2007), doi:10.1029/2007GL029258.
- Greenberg et al., 2007, Eran Greenberg, Colin Price, Yoav Yair, Michal Ganot, József Bór and Gabriella Satori, *ELF Transients associated with sprites and ELVES in Eastern Mediterranean winter thunderstorms*, J. Atmos. Solar-Terrest. Phys., Vol. 69, Issue 13, pp. 1569-1586, doi:10.1016/j.jastp.2007.06.002, September 2007
- Greifinger és Greifinger, 1978, Greifinger, C. and Greifinger, P.: *Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth-ionosphere waveguide*, Radio Sci., 13, 831–837, 1978.
- Hales, 1948, Hales, A. L., *A Possible Mode of Propagation of the 'Slow' or Tail Component in Atmospherics*, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 193, Issue 1032, pp. 60-71
- Hampton et al., 1996, Hampton, D. L., M. J. Heavner, E. M. Wescott, and D. D. Sentman, *Optical spectral characteristics of sprites*, Geophys. Res. Lett., 23(1), pp. 89–92, (1996), doi:10.1029/95GL03587.
- Hardman et al., 2000, Hardman, S. F., R. L. Dowden, J. B. Brundell, J. L. Bahr, Z. Kawasaki, and C. J. Rodger, *Sprite observations in the Northern Territory of Australia*, J. Geophys. Res., 105(D4), pp. 4689–4697, (2000), doi:10.1029/1999JD900325.
- Harth, 1982, Harth, W., *Theory of low frequency wave propagation*, in: Hans Volland, Editor, Handbook of Atmospherics, Volume I, CRC Press, Boca Raton inc., FL (1982), pp. 133-202.

- Heavner, 2000, Heavner, M. J., *Optical spectroscopic observations of sprites, blue jets, and elves: Inferred microphysical processes and their macrophysical implications*, Ph.D. dissertation, University of Alaska Fairbanks, 2000.
- Hepburn, 1957, Hepburn, F., *Atmospheric waveforms with very lowfrequency components below 1kc/s known as slow tails*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics 10, 266-287., 1957
- Hiraki és Fukunishi, 2006, Yasutaka Hiraki and Hiroshi Fukunishi, *Theoretical criterion of charge moment change by lightning for initiation of sprites*, Journal of Geophysical Research, vol. 111, A11305, doi:10.1029/2006JA011729, 2006
- Hobara et al, 2001, Hobara, Y., N. Iwasaki, T. Hayashida, M. Hayakawa, K. Ohta, and H. Fukunishi, *Interrelation between ELF transients and ionospheric disturbances in association with sprites and elves*, Geophys. Res. Lett., 28(5), 935–938, (2001), doi:10.1029/2000GL003795.
- Hsu et al., 2009, Rue-Ron Hsu, Alfred B. Chen, Cheng-Ling Kuo, Han-Tzong Su, Harald Frey, Stephen Mende, Yukihiro Takahashi, and Lou-Chung Lee, *On the Global Occurrence and Impacts of Transient Luminous Events (TLEs)*, in Norma B. Crosby, Tai-Yin Huang, Michael J. Rycroft, Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near-Earth Space: Proceedings of the Workshop Corte (France), 23-27 June 2008, AIP Conference Proceedings, Volume 1118, pp. 99-107, ISBN: 978-0-7354-0657-5, ISSN: 0094-243X, doi:10.1063/1.3137720, 2009
- Hu et al., 2002, Hu, W., S. A. Cummer, W. A. Lyons, and T. E. Nelson, *Lightning charge moment changes for the initiation of sprites*, Geophysical Research Letters, vol. 29, no. 8, 1279, doi:10.1029/2001GL014593, 2002.
- Huang, 1998, Huang, E.W., *Electromagnetic transients, elves, and sprites in the earth-ionosphere waveguide*, Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 257 pp., 1998
- Huang et al., 1999, Huang, E., E. Williams, R. Boldi, S. Heckman, W. Lyons, M. Taylor, T. Nelson, and C. Wong, *Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations*, J. Geophys. Res., 104(D14), 16,943–16,964, (1999), doi:10.1029/1999JD900139.
- IAGA VMOD, 2005, International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA), Division V, Working Group VMOD: Geomagnetic Field Modeling, 2005. The 10th-Generation International Geomagnetic Reference Field. Geophysical Journal International, No. 161, 561-565.
- Ishaq és Jones, 1977, Ishaq, M. and Jones, D.Ll., *Method of obtaining radiowave propagation parameters for the earth-ionosphere duct at ELF*, Electron. Lett. Vol. 13, No. 9, pp. 254–255., 1977.

- Iwanski et al., 2009, Iwanski, R., Anna Odzimek, Lasse Clausen, Vijay Kanawade, Ingrid Cnossen, and Niklas Edberg, *Meteorological study of the first observation of red sprites from Poland*, Acta Geophysica, vol. 57, no. 3, pp. 760-777, 2009, DOI: 10.2478/s11600-009-0008-7
- Jones, 1967, D.Llanwyn Jones, *Schumann Resonances and e.l.f. propagation for inhomogeneous, isotropic ionosphere profiles*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Volume 29, Issue 9, September 1967, Pages 1037-1044, doi:10.1016/0021-9169(67)90138-9
- Jones, 1970a, Jones DL, *Numerical computations of terrestrial ELF electromagnetic wave fields in the frequency domain*, Radio Sci., 5, pp. 803–809, (1970)
- Jones, 1970b, Jones DL, *Propagation of ELF pulses in the Earth–ionosphere cavity and application to slow tail sferics*, Radio Sci., 5, pp. 1153–1163, (1970)
- Jones, 1970c, Jones, D. L., *Electromagnetic radiation from multiple return strokes of lightning*, J. Atmos. Terr. Phys., 32, 1077, 1970.
- Jones és Kemp, 1970, Jones DL, Kemp DT, *Experimental and theoretical observations of Schumann resonances*, J Atmos Terr Phys, 32, pp. 1095–1108, (1970)
- Jones és Burke, 1990. D. Llanwyn Jones and C.P. Burke, *ELF propagation in the Earth–ionosphere duct*. In: 23rd URSI General Assembly (1990).
- Kemp, 1971, Kemp DT, *The global location of large lightning discharges from single station observations of ELF disturbances in the Earth–ionosphere cavity*, J. Atmos. Terr. Phys., 33, pp. 919–928, (1971)
- Kemp és Jones, 1971, Kemp DT, and Jones DL, *A new technique for analysis of transient ELF electromagnetic disturbances within the Earth–ionosphere cavity*, J Atmos Terr Phys, 33, pp.567–572, (1971)
- Khomich et al., 2008, Vladislav Yu. Khomich, Anatoly I. Semenov and Nicolay N. Shefov, *Airglow as an Indicator of Upper Atmospheric Structure and Dynamics*, Springer Berlin Heidelberg, XVI, 740 p. 278 illus., Hardcover, ISBN: 978-3-540-75832-7, DOI: 10.1007/978-3-540-75833-4, 2008
- Krehbiel et al., 1979, Krehbiel, P. R., M. Brook, and R. A. McCrory, *An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to Ground*, J. Geophys. Res. , 1979, 84(C5), 2432–2456, doi:10.1029/JC084iC05p02432.
- Krehbiel et al., 2008, Paul R. Krehbiel, Jeremy A. Rioussel, Victor P. Pasko, Ronald J. Thomas, William Rison, Mark A. Stanley, and Harald E. Edens, *Upward electrical discharges from thunderstorms*, Nature Geoscience, 1, pp. 233 – 237, (2008), doi:10.1038/ngeo162

- Kuo et al., 2009, Kuo, Cheng-Ling; Chou, J. K.; Tsai, L. Y.; Chen, A. B.; Su, H. T.; Hsu, R. R.; Cummer, S. A.; Frey, H. U.; Mende, S. B.; Takahashi, Y.; Lee, L. C., *Discharge processes, electric field, and electron energy in ISUAL-recorded gigantic jets*, J. Geophys. Res., 114, A04314, (2009), doi:10.1029/2008JA013791.
- Large és Wait, 1968, Large, D. B., and J. R. Wait, *Theory of electromagnetic coupling phenomena in the earth-ionosphere cavity*, J. Geophys. Res., 73, (1968), pp. 4335-4362.
- Lehtinen és Inan, 2007, Lehtinen, N. G., and U. S. Inan, *Possible persistent ionization caused by giant blue jets*, Geophys. Res. Lett., 34, L08804, 2007, doi:10.1029/2006GL029051.
- Lindblad, 1968, Lindblad, B. A, *Long-Term Variations in Meteor Radar Rates, Meteor Heights and Radar-Echo Amplitudes, Physics and Dynamics of Meteors*, Symposium no. 33 held at Tatranska Lomnica, Czechoslovakia, 4-9 September 1967. Edited by Lubor Kresak and Peter Mackenzie Millman. International Astronomical Union. Symposium no. 33, Dordrecht, D. Reidel, p.50
- Lyons, 1996, Lyons, W. A., *Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems*, J. Geophys. Res., 101(D23), 29641–29652, (1996), doi:10.1029/96JD01866.
- Lyons et al., 1998, Lyons, Walter A.; Nelson, Thomas E.; Williams, Earle R.; Cramer, John A.; Turner, Tommy R., *Enhanced Positive Cloud-to-Ground Lightning in Thunderstorms Ingesting Smoke from Fires*, Science, Vol. 282, Iss. 5386, p. 77 (1998), DOI: 10.1126/science.282.5386.77
- Lyons et al., 2000, Lyons, W.A, T. E. Nelson and Judy Fossum, *Results from the Sprites-99 and STEPS 2000 Field Programs*, Preprints, 20th Conf. on Severe Local Storms, AMS, Orlando, 4 pp., 2000, „<http://www.fma-research.com/Papers&presentations/SELS2000.pdf>”
- Lyons et al., 2003a, Walter A. Lyons, Thomas E. Nelson, Russell A. Armstrong, Victor P. Pasko, Mark A. Stanley, *Upward Electrical Discharges From Thunderstorm Tops*, Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84:4, pp. 445-454
- Lyons et al., 2003b W.A. Lyons, T.E. Nelson, E.R. Williams, S.A. Cummer and M.A. Stanley, *Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective systems*, Mon. Weather Rev. 131 (2003), pp. 2417–2427.
- Lyons, 2006, Lyons, W. A., *The meteorology of transient luminous events – an introduction and overview*, in: Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, edited by: Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., vol. 225 of NATO Science Series II. Mathematics, physics and chemistry, pp. 19–56, Springer Verlag, 978-1-4020-4627-8, 2006, doi: 10.1007/1-4020-4629-4_2
- Lyons et al., 2008, Lyons, Walter A.; Cummer, Steven A.; Stanley, Mark. A.; Huffines, Gary R.; Wiens, Kyle C.; Nelson, Thomas E., *Supercells and Sprites*, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 89, issue 8, p. 1165, 2008, DOI:10.1175/2008BAMS2439.1

- Lyons et al., 2009, Lyons, W. A., M. A. Stanley, J. D. Meyer, T. E. Nelson, S. A. Rutledge, T. J. Lang, and S. A. Cummer, *The meteorological and electrical structure of TLE-producing convective storms*, in: *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Eds. H.-D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Springer Science+Business Media B.V., 2009, ISBN: 978-1-4020-9078-3, Chapter 17, pp. 387-415, doi:10.1007/978-1-4020-9079-0_17
- Mach et al., 2007, Mach, D. M., H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, S. J. Goodman, and W. L. Boeck, *Performance assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor*, *J. Geophys. Res.*, 112, D09210, 12 pp., (2007), doi:10.1029/2006JD007787.
- Marshall et al., 2005, Marshall, R. A., U. S. Inan, T. Neubert, A. Hughes, G. Satori, J. Bor, A. Collier, and T. H. Allin, *Optical observations geomagnetically conjugate to sprite-producing lightning discharges*, *Ann. Geophys.*, Vol. 23, pp. 2231-2237, 2005 September
- Marshall et al., 2006, Marshall, R. A., Inan, U. S., and Lyons, W. A.: *On the association of early/fast very low frequency perturbations with sprites and rare examples of VLF backscatter*, *Journal of Geophysical Research*, 111, D19 108, doi:10.1029/2006JB007219, 2006.
- Marshall és Inan, 2007, Marshall, R. A., and U. S. Inan, *Possible direct cloud-to-ionosphere current evidenced by sprite-initiated secondary TLEs*, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L05806, (2007), doi: 10.1029/2006GL028511
- Marshall et al., 2007, Marshall, R. A., U. S. Inan, and W. A. Lyons, *Very low frequency sferic bursts, sprites, and their association with lightning activity*, *J. Geophys. Res.*, 112, D22105, doi:10.1029/2007JD008857., 2007
- Matsudo et al., 2007, Matsudo, Yu; Suzuki, Tomoyuki; Hayakawa, Masashi; Yamashita, Kozo; Ando, Yoshiaki; Michimoto, Koichiro; Korepanov, V., *Characteristics of Japanese winter sprites and their parent lightning as estimated by VHF lightning and ELF transients*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 69, Issue 12, p. 1431-1446., DOI:10.1016/j.jastp.2007.05.002
- Matsudo et al., 2009, Y. Matsudo, T. Suzuki, K. Michimoto, K. Myokei and M. Hayakawa, *Comparison of time delays of sprites induced by winter lightning flashes in the Japan Sea with those in the Pacific Ocean*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 71, Issue 1, January 2009, Pages 101-111, doi:10.1016/j.jastp.2008.09.040
- McDonald, 2009, Kirk T. McDonald, *Dielectric Image Methods*, Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, NJ 08544, (November 21, 2009), <http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/image.pdf>
- Melnikov et al., 2004, A. Melnikov, C. Price, G. Satori and M. Füllekrug, *Influence of solar terminator passages on Schumann resonance parameters*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 66, Issues 13-14, September 2004, Pages 1187-1194, doi:10.1016/j.jastp.2004.05.014

- Mika et al., 2005, Mika, Á.; Haldoupis, C.; Marshall, R. A.; Neubert, T.; Inan, U. S., *Subionospheric VLF signatures and their association with sprites observed during EuroSprite-2003*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 67, Issue 16, p. 1580-1597., 2005, DOI: 10.1016/j.jastp.2005.08.011
- Mika, 2007, Mika, Ágnes, *Very Low Frequency EM Wave Studies of Transient Luminous Events in the Lower Ionosphere*, PhD Thesis, Department of Physics, Faculty of Astrophysics and Space Physics, University of Crete, Heraklion, May 2007, <http://cal-crete.physics.uoc.gr/VLF-sprites/files/Mika-thesis-2007.pdf>
- Mitchell, 1976, V.B. Mitchell, *Schumann resonance—some properties of discrete events*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Volume 38, Issue 1, January 1976, Pages 77-81, doi:10.1016/0021-9169(76)90196-3
- Mohanakumar, 2008, K. Mohanakumar, *Stratosphere troposphere interactions: an introduction*, Springer, 2008, ISBN:1402082169, 9781402082160, 416 p.
- Moore et al., 2003, Moore, R. C., Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S., and Bell, T. F., *Early/fast VLF events produced by electron density changes associated with sprite halos*, Journal of Geophysical Research, 108(A10), 1363, doi:10.1029/2002JA009816, 2003.
- Moudry et al., 1998, D. R. Moudry and M. J. Heavner and D. D. Sentman and E. M. Wescott and J. S. Morrill and C. Siefring, *Morphology of Sprites*, EOS Supplement, 79(45):F136, November 1998. (A31A-10 poster)
- Mushtak és Williams, 2002, Mushtak, V. C. and Williams, E. R., *ELF propagation parameters for uniform models of the Earth-ionosphere waveguide*, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 64, 1989–2001, 2002.
- Nagy, 1989, Nagy Károly, Elektrodinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 5. kiadás, 1989, 338 p.
- Nakamura et al., 2010, T. Nakamura, M. Sekiguchi, Y. Hobara, and M. Hayakawa, *A comparison of different source location methods for ELF transients by using the parent lightning discharges with known positions*, Journal of Geophysical Research, vol. 115, A00E39, doi:10.1029/2009JA014992, 2010
- Neubert et al., 2001, Neubert, T., T. H. Allin, H. Stenbaek-Nielsen, and E. Blanc, *Sprites over Europe*, Geophys. Res. Lett., 28(18), pp. 3585–3588, (2001), doi:10.1029/2001GL013427.
- Neubert et al., 2005, Neubert, T., T. H. Allin, E. Blanc, T. Farges, C. Haldoupis, A. Mika, S. Soula, L. Knutsson, O. van der Velde, R. A. Marshall, U. Inan, G. Satori, J. Bór, A. Hughes, A. Collier, S. Laursen and I. L. Rasmussen, *Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign*, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 67, pp. 807-820, 2005.

- Neubert et al., 2008, Neubert, T.; Rycroft, M.; Farges, T.; Blanc, E.; Chanrion, O.; Arnone, E.; Odzimek, A.; Arnold, N.; Enell, C.-F.; Turunen, E.; Bössinger, T.; Mika, Á.; Haldoupis, C.; Steiner, R. J.; van der Velde, O.; Soula, S.; Berg, P.; Boberg, F.; Thejll, P.; Christiansen, B.; Ignaccolo, M.; Füllekrug, M.; Verronen, P. T.; Montanya, J.; Crosby, N., *Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesosphere*, Surveys in Geophysics, vol: 29, issue: 2, pages: 71-137, 2008, Springer Netherlands, ISSN: 0169-3298, DOI: 10.1007/s10712-008-9043-1
- Nickolaenko és Rabinowicz, 1974, A. P. Nickolaenko and L. M. Rabinowicz, *Speeding up the convergence of the zonal harmonic series representation in the Schumann resonance problem*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Volume 36, Issue 6, June 1974, Pages 979-987, doi:10.1016/0021-9169(74)90007-5
- Nickolaenko és Kudintseva, 1994, A.P. Nickolaenko and I.G. Kudintseva, *A modified technique to locate the sources of ELF transient events*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 56, (1994), p. 1493.
- Nickolaenko és Hayakawa, 1998, Nickolaenko, A. P., and M. Hayakawa, *Natural electromagnetic pulses in the ELF range*, Geophys. Res. Lett., 25(16), pp. 3103–3106, (1998), doi:10.1029/98GL01699.
- Nickolaenko és Hayakawa, A. P. Nickolaenko and M. Hayakawa, 1999, *A Model for Causative Discharge of ELF-Transients*, J. Atmos. Elec., 19, pp. 11-24., 1999
- Nickolaenko és Hayakawa, 2002, A.P. Nickolaenko and M. Hayakawa, *Resonances in the Earth-Ionosphere Cavity*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London (2002).
- Nickolaenko et al., 2010, Nickolaenko, A. P.; Hayakawa, M.; Hobara, Y., *Q-Bursts: Natural ELF Radio Transients*, Surveys in Geophysics, Volume 31, Issue 4, pp.409-425, 2010, DOI:10.1007/s10712-010-9096-9
- Ogawa et al., 1966, Ogawa, T., Tanaka Y., Miura. T., and Yasuhara, M. I., *Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using ball antennas*. J. Geomag. Geoelectr. 18: 443-54., 1966
- Ondrášková et al., 2010, A. Ondrášková, S. Ševčík, P. Kostecký, J. Tóth, R. Kysel, *On the relation between the red sprites and the transients in the ELF band*, Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 40/2, 2010, pp. 149-157
- Oppenheim et al., 1999, Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, John R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall; 2 edition (January 10, 1999), 870 pp., ISBN-10: 0137549202, ISBN-13: 978-0137549207
- Ostapenko et al., 2010, Ostapenko, A. A.; Titova, E. E.; Nickolaenko, A. P.; Turunen, T.; Manninen, J.; Raita, T., *Characteristics of VLF atmospherics near the resonance frequency of the Earth-ionosphere waveguide 1.6-2.3 kHz by observations in the auroral region*, Annales Geophysicae, Volume 28, Issue 1, 2010, pp.193-202, doi:10.5194/angeo-28-193-2010

- Pasko et al., 1995, Pasko, V. P., U. S. Inan, Y. N. Taranenko, and T. F. Bell, *Heating, ionization and upward discharges in the mesosphere, due to intense quasi-electrostatic thundercloud fields*, Geophys. Res. Lett., 22(4), 365–368, (1995), doi:10.1029/95GL00008.
- Pasko et al., 2002, Pasko, V. P., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan, and T. G. Wood, *Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere*, Nature, 416, 152–154, (2002), doi:10.1038/416152.
- Pasko, 2006, Pasko, V. P., *Theoretical modeling of sprites and jets*, in: Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, edited by: Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., vol. 225 of NATO Science Series II. Mathematics, physics and chemistry, pp. 253–311, Springer Verlag, ISBN 978-1-4020-4627-8, 2006, doi: 10.1007/1-4020-4629-4_12
- Pechony és Price, 2006, Pechony, O., and C. Price, *Schumann resonances: Interpretation of local diurnal intensity modulations*, Radio Sci., 41, RS2S05, doi:10.1029/2006RS003455, (2006), [printed in 42(2), 2007]
- Pechony et al., 2007, Pechony, O., C. Price, and A. P. Nickolaenko, *Relative importance of the day-night asymmetry in Schumann resonance amplitude records*, Radio Sci., 42, RS2S06, (2007), doi:10.1029/2006RS003456
- Pierce , 1955, Pierce, E. T., *Electrostatic field changes due to lightning discharges*, Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 81, 211–228, 1955
- Polk, 1982, Charles Polk, *Schumann Resonances*, in: Hans Volland, Editor, Handbook of Atmospherics, Volume I, CRC Press, Boca Raton inc., FL (1982), pp. 111–179.
- Popov, 1896, Popov A.S. *The Apparatus for Detecting and Recording Electrical Oscillations*, Russian Physical Chemical Society, 1896, Vol. 28, №1, p.1-14
- Price et al., 2007, Price, C., O. Pechony, E. Greenberg. *Schumann resonances in lightning research*. Journal of Lightning Research 1: 1– 15., (2007)
- Rakov et al., 2001, Rakov, V. A., D. E. Crawford, K. J. Rambo, G. H. Schnetzer, M. A. Uman, and R. Thottappillil, *M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges*, J. Geophys. Res., 106(D19), pp. 22817–22831, (2001), doi:10.1029/2000JD000243.
- Rakov és Uman, 2003, Rakov and Uman, 2003 V.A. Rakov and M.A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge Univ. Press, New York (2003) 687pp., ISBN 0521583276 hardback
- Riesing et al., 1996, Reising, S., U. Inan, T. Bell, and W. Lyons, *Evidence for continuing current in sprite-producing cloud-to-ground lightning*, Geophysical Research Letters, 23, 3639–42, 1996.

- Rodger és McCormick, 2006, Craig J. Rodger and R. J. McCormick, *Remote sensing of the upper atmosphere by VLF*, in: Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges, edited by: Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., vol. 225 of NATO Science Series II. Mathematics, physics and chemistry, pp. 167–190, Springer Verlag, ISBN 978-1-4020-4627-8, 2006, doi: 10.1007/1-4020-4629-4_8
- Rodger et al., 2008, Rodger, C. J., A. Seppälä, and M. A. Clilverd, *Significance of Transient Luminous Events to neutral chemistry: experimental measurements*, Geophys. Res. Lett., 35, L07803, doi:10.1029/2008GL033221, 2008.
- Rodger et al., 2009, Rodger, C J, J B Brundell, R H Holzworth, and E H Lay, *Growing Detection Efficiency of the World Wide Lightning Location Network*, Am. Inst. Phys. Conf. Proc., Coupling of thunderstorms and lightning discharges to near-Earth space: Proceedings of the Workshop, Corte (France), 23-27 June 2008, 1118, 15-20, DOI:10.1063/1.3137706, 2009.
- Roussel-Dupré és Gurevich, 1996, Roussel-Dupré, R., and A. V. Gurevich, *On runaway breakdown and upward propagating discharges*, J. Geophys. Res., 101(A2), 2297–2311, (1996), doi:10.1029/95JA03278.
- Rycroft et al., 2008, Michael J. Rycroft, R. Giles Harrison, Keri A. Nicoll, Evgeny A. Mareev, *An Overview of Earth's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity*, Space Sci Rev (2008) 137: 83–105, DOI 10.1007/s11214-008-9368-6, (pdf letöltve)
- Sao-Sabbas et al., 2003, Sao-Sabbas, Fernanda T.; Sentman, Davis D.; Wescott, Eugene M.; Pinto, Osmar; Mendes, Odin; Taylor, Michael J., *Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 65, Issue 5, p. 525-535., 2003, DOI:10.1016/S1364-6826(02)00326-7
- Sao-Sabbas, 2008, Fernanda Sao Sabbas, *Sprite Research in Brazil: an Overview*, contributed talk on the Workshop on Coupling of Thunderstorms and Lightning Discharges to Near-Earth Space, 23-27 June 2008, University of Corsica, Corte, France, <http://www.oma.be/TLE2008Workshop/COST/Sao-Sabbas.ppt>
- Sato és Fukunishi, 2003, Sato, M., and H. Fukunishi, , *Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events*, Geophys. Res. Lett., 30(16), Art. No. 1859, (2003), doi:10.1029/2003GL017291.
- Sato et al., 2008 Sato, M., Ushio, T., Morimoto, T., Suzuki, M., Takahashi, Y., *The JEM-GLIMS mission*. Jap. Geos. Union Meet., Chiba, Japan, 2008., Abstract E207-018.
- Sátori et al., 1996, Sátori, G., J. Szendrői, J., and J. Verő, *Monitoring Schumann Resonances-I. Methodology*, J. Atmos.Terr. Phys., 58 (13), 1475-1481, 1996.
- Sátori, 2007, G. Sátori, *Schumann resonance observations*, in Geophysical Observatory Reports of the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Nagycenk Geophysical Observatory, Year 2005-2006, Hillebrand nyomda Kft, ISBN 798-963-8381-22-4, 2007

- Sátori et al. 2007, G. Sátori, M. Neska, E. Williams, J. Szendrői, “*Signatures of the day-night asymmetry of the Earth-ionosphere cavity in high time resolution Schumann resonance records*”, Radio .Sci., 42, 2007, doi:10.1029/2006RS003483, RS2S10
- Sátori et al. 2009, Gabriella Sátori, Vadim Mushtak and Earle Williams, *Schumann Resonance Signatures of Global Lightning Activity*, in *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research* by Hans Dieter Betz (Editor), Ulrich Schumann (Editor), Pierre Laroche (Editor), Springer-Verlag New York, LLC, January 2009, ISBN: 978-1-4020-9078-3, Chapter 16, pp. 347-386, doi:10.1007/978-1-4020-9079-0_16
- Schulz et al., 2005, Schulz, W., Cummins, K., Diendorfer, G., and Dorninger, M., *Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system*, J. Geophys. Res., 110, D09101, doi:10.1029/2004JD005332, 2005.
- Schumann, 1952, Schumann W. O., *Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist*, Zeitschrift und Naturforschung 7a: 149-154., (1952)
- Schumann, 1956, Schumann, W. O., *Über die zeitliche Form und des Spectrum ausgesendeter Dipolsignale in einer dielektrischen Hohlkugel mit leitenden Wänden*, Verlag Bayerischen Akad. Wiss., Munich, 1956
- Sentman, 1989, D. D. Sentman, *Detection of elliptical polarization and mode splitting in discrete Schumann resonance excitations*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, Volume 51, Issue 6, June 1989, Pages 507-519, doi:10.1016/0021-9169(89)90090-1
- Sentman, 1990, Sentman, D. D., *Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere*, J. Atmos. Terr. Phys. 52, 35–43, 1990.
- Sentman és Fraser, 1991, Sentman, D. D. and B. J. Fraser, *Simultaneous observations of Schumann resonances in California and Australia: Evidence for intensity modulation by the local height of the D region*, J. Geophys. Res., 96, 15973-15984, 1991.
- Sentman, 1995, D.D. Sentman, *Schumann resonances*. In: H. Volland, Editor, *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* vol. I, CRC Press, Boca Raton, FL (1995), pp. 267–295.
- Sentman et al., 1995, Sentman, D.D., Wescott, E.M., Osborne, D.L., Hampton, D.L., and Heavner, M.J., *Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites*. Geophysical Research Letters 22, p. 1205, 1995
- Siefring et al., 1999, Siefring, C.L., Morrill, J.S., Sentman, D.D., Moudry, D.R., Wescott, E.M., Heavner, M.J., Osborne, D.L., Bucsela, E.J., *Do sprites sometimes connect to the cloud tops?* EOS Trans. AGU 8D (46), F225., 1999.
- Smith, 1997, Steven W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, Hardcover, California Technical Pub., 1997, 1st edition, 626 pp., ISBN:0966017633; Free online book: <http://www.dspguide.com/>

- Stanley et al., 1999, Stanley, M., P. Krehbiel, M. Brook, C. Moore, W. Rison, and B. Abrahams, *High speed video of initial sprite development*, Geophys. Res. Lett., 26(20), 3201–3204, (1999), doi:10.1029/1999GL010673.
- Stanley et al., 2000, Stanley, M., M. Brook, P. Krehbiel, and S. A. Cummer, *Detection of daytime sprites via a unique sprite ELF signature*, Geophysical Research Letters, vol. 27, p. 875, 2000.
- Stanley et al., 2007, Stanley et al., 2007 Stanley, M.A., Lyons, W.A., Nelson, T.E., Krehbiel, P.R., Rison, W., Thomas, R.J. *Comparison of sprite locations with lightning channel structure*. Eos Trans. AGU, 88(52), Fall Meet., 2007. Suppl., Abstract AE41A-07.
- Stenbaek-Nielsen et al., 2007, Stenbaek-Nielsen, H. C., M. G. McHarg, T. Kanmae, and D. D. Sentman, *Observed emission rates in sprite streamer heads*, Geophys. Res. Lett., 34 (11), L11105, 2007, doi:10.1029/2007GL029881.
- Stenbaek-Nielsen és McHarg, 2008, H. C. Stenbaek-Nielsen and M. G. McHarg, *High time-resolution sprite imaging: observations and implications*, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 41, No.23, 234009, 14 pp., 2008, doi: 10.1088/0022-3727/41/23/234009
- Stenbaek-Nielsen et al., 2010, Stenbaek-Nielsen, H. C., R. Haaland, M. G. McHarg, B. A. Hensley, and T. Kanmae, *Sprite initiation altitude measured by triangulation*, J. Geophys. Res., 115, (2010), A00E12, doi:10.1029/2009JA014543.
- Stolzenburg és Marshall 2009, Stolzenburg, M., and T. C. Marshall, *Electric field and charge structure in lightning-producing clouds*, in Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research by Hans Dieter Betz (Editor), Ulrich Schumann (Editor), Pierre Laroche (Editor), Springer-Verlag New York, LLC, January 2009, 641 pp., ISBN: 978-1-4020-9078-3, Chapter 3, pp. 57-82, doi:10.1007/978-1-4020-9079-0_3
- Su et al., 2002, Su, H.-T., R.-R. Hsu, A. B.-C. Chen, Y.-J. Lee, and L.-C. Lee, *Observation of sprites over the Asian continent and over oceans around Taiwan*, Geophys. Res. Lett., 29(4), 1044, (2002), doi:10.1029/2001GL013737.
- Su et al., 2003, Su H.T., Hsu R.R., Chen A.B., Wang Y.C., Hsiao W.S., Lai W.C., Lee L.C., Sato M., Fukunishi H., *Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere*, Nature, 423, pp. 974– 976, (2003), doi:10.1038/nature01759.
- Sukhorukov és Stubbe, 1997, Sukhorukov, A. I., and P. Stubbe, *On ELF pulses from remote lightnings triggering sprites*, Geophys. Res. Lett., 24(13), 1639–1642, (1997), doi:10.1029/97GL01602.
- Suzuki et al., 2006, T. Suzuki, M. Hayakawa, Y. Matsudo and K. Michimoto, *How do winter thundercloud systems generate sprite-induced lightning in the Hokuriku area of Japan?*, Geophys. Res. Lett. 33 (2006) 10.1029/2005GL025433.
- Tepley, 1959, Tepley, L. R., *A Comparison of Sferics as Observed in the Very Low Frequency and Extremely Low Frequency Bands*, J. Geophys. Res., 64(12), 2315–2329, (1959), doi:10.1029/JZ064i012p02315.

- Thomas et al., 2000, Thomas, R. J., P. R. Krehbiel, W. Rison, T. Hamlin, D. J. Boccippio, S. J. Goodman, and H. J. Christian, *Comparison of ground-based 3-dimensional lightning mapping observations with satellite-based LIS observations in Oklahoma*, Geophys. Res. Lett., 27(12), 1703–1706, (2000), doi:10.1029/1999GL010845.
- Thomas et al., 2007, Thomas, J. N., Taylor, M. J., Pautet, P. D., Bailey, M., Solorzano, N. N., Holzworth, R. H., McCarthy, M., Kokorowski, M., São Sabbas, F. T., Pinto, O., Cummer, S., Jaugey, N., Li, J., Schuch, N. J.: *A Very Active Sprite-Producing Storm Observed over Argentina*, EOS Trans. Am. Geophys. Union, 88(10), doi:10.1029/2007EO100001, 2007.
- Thottappillil, 2003, Rajeev Thottappillil, *Computation of electromagnetic fields from lightning discharge*, Chapter 5. in Vernon Cooray, *The lightning flash*, 34, IEE Power Series, IET, 2003, ISBN 0852967802, 9780852967805, 574 p.
- Uman, 1987, M.A. Uman, *The lightning discharge*. In: W.L. Donn, Editor, International Geophysics Series, Volume 39, Academic Press, New York (1987).
- Vadislavsky et al., 2009, Elyakom Vadislavsky, Yoav Yair, Carynelisa Erlick, Colin Price, Eran Greenberg, Roy Yaniv, Baruch Ziv, Nàama Reicher and Adam Devir, *Indication for circular organization of column sprite elements associated with Eastern Mediterranean winter thunderstorms*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 71, Issues 17-18, December 2009, Pages 1835-1839, doi:10.1016/j.jastp.2009.07.001
- van der Velde et al., 2006, van der Velde, O. A., Á. Mika, S. Soula, C. Haldoupis, T. Neubert, and U. S. Inan, *Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes*, J. Geophys. Res., 111, D15203, (2006), doi:10.1029/2005JD006879.
- van der Velde et al., 2007, van der Velde, O. A., W. A. Lyons, T. E. Nelson, S. A. Cummer, J. Li, and J. Bunnell, *Analysis of the first gigantic jet recorded over continental North America*, J. Geophys. Res., 112, D20104, (2007), doi:10.1029/2007JD008575
- van der Velde et al., 2010, Oscar van der Velde, Jozsef Bor, Jingbo Li, Steven Cummer, Enrico Arnone, Ferruccio Zanotti, Martin Füllekrug, Christos Haldoupis, Samir Naitamor, Thomas Farges, *Multi-instrumental observations of a positive gigantic jet produced by a winter thunderstorm in Europe*, Submitted to Journal of Geophysical Research Atmospheres on 03. August, 2010., Status: Accepted (közlésre elfogadva)
- Volland, 1982, H. Volland, *Low frequency radio noise*, in Handbook of Atmospheric, vol. 1, H. Volland, Ed. Boca Raton: CRC Press, 1982, pp. 179-250.
- Vonnegut et al., 1989, B. Vonnegut, O. H. Vaughan, Jr., and M. Brook, "Nocturnal Photographs Taken from a U-2 Airplane Looking Down on Tops of Clouds Illuminated by Lightning", (1989), Bull. Amer. Meteor. Soc. 70, 10, pp 1263-1271
- Wait, 1960, J. R. Wait, "On the theory of the slow tail portion of atmospheric wave forms," J. Geophys. Res., vol. 65, no. 7, pp. 1939–1946, 1960.

- Wait, 1962, 1970, 1996, James R. Wait, *Electromagnetic waves in stratified media*, Oxford England: Pergamon Press (1962), Oxford England: Pergamon Press second revised edition ISBN:0080066364 (1970), Institute of Electrical and Electronics Engineers Oxford University Press in New York ISBN10:019859223X, 0780311248 new edition (1996)
- Watson, 1918, Watson, G. N., *The diffraction of radio waves by the earth*, Proc. Roy. Soc. London, A, 95, 83-99, 1918
- Wescott et al., 1995, Wescott, E. M., D. Sentman, D. Osborne, D. Hampton, and M. Heavner, *Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 2. Blue jets*, Geophys. Res. Lett., 22(10), 1209–1212, (1995), doi:10.1029/95GL00582.
- Wescott et al., 1998, Wescott, E.M., Sentman, D.D., Heavner, M.J., Hampton, D.L., Lyons, W.A., Nelson, T., *Observations of 'Columniform' sprites*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 60, pp. 737–740., 1998.
- Wescott et al., 2001, Wescott, E. M., H. C. Stenbaek-Nielsen, D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. R. Moudry, and F. T. S. Sabbas, *Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors*, J. Geophys. Res., 106(A1), pp. 10,467–10,477, (2001), doi:10.1029/2000JA000182.
- Williams, 1959, Williams, JC, *Thunderstorms and VLF radio noise*, Ph.D. dissertation, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1959
- Williams, 2001, Williams, E. R., *Sprites, Elves, and Glow Discharge Tubes*, Physics Today, Volume 54, Number 11, pp. 41-47, 2001.
- Williams és Yair, 2006, E. R. Williams and Y. Yair. *The microphysical and electrical properties of sprite producing thunderclouds*, in: *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, edited by: Füllekrug, M., Mareev, E. A., and Rycroft, M. J., vol. 225 of NATO Science Series II. Mathematics, physics and chemistry, pp. 57–83, Springer Verlag, ISBN 978-1-4020-4627-8, 2006, doi: 10.1007/1-4020-4629-4_3
- Williams et al., 2007, Williams, E.; Downes, E.; Boldi, R.; Lyons, W.; Heckman, S., *Polarity asymmetry of sprite-producing lightning: A paradox?*, Radio Science, Volume 42, Issue 2, CiteID RS2S17, 2007, DOI:10.1029/2006RS003488
- Williams et al., 2009, Earle Williams, József Bór, Cheng-Ling Kuo, Gabriella Satori, Robert Boldi, A. B. Chen, Eric Downes, R.R. Hsu, Walter A. Lyons, M. M. F. Saba, and H.T. Su, *Halos: a solution to the sprite polarity paradox?*, contribution talk on the IAGA 11th Scientific Assembly, Sopron, 24-29 August, 2009, Abstract no. 201-MON-O0930-0789
- Williams et al., 2010, E. R. Williams, W. A. Lyons, Y. Hobara, V. C. Mushtak, N. Asencio, R. Boldi, J. Bór, S. A. Cummer, E. Greenberg, M. Hayakawa, R. H. Holzworth, V. Kotroni, J. Li, C. Morales, T. E. Nelson, C. Price, B. Russell, M. Sato, G. Satori, K. Shirahata, Y. Takahashi, K. Yamashita, *Ground-based detection of sprites and their parent lightning flashes over Africa during the 2006 AMMA campaign*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(s1), pp. 257-271, (2010), DOI: 10.1002/qj.489

- Wilson, 1925, Wilson, C. T. R., *The electric field of a thunderstorm and some of its effects*, Proc. Phys. Soc., London, D, 37, pp. 32-37., 1925
- Winands, 2007, Winands, G.J.J., *Efficient streamer plasma generation*, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2007,
https://venus.tue.nl/ep-cgi/ep_publ_detail.opl?taal=NL&rn=19961176&volgnr=208846
- Winckler et al., 1996, Winckler, J. R., W. A. Lyons, T. E. Nelson, and R. J. Nemzek, *New high-resolution ground-based studies of sprites*, J. Geophys. Res., 101(D3), 6997–7004, (1996), doi:10.1029/95JD03443.
- Wong, 1996, Charles Teng Wong, *A Global Transients Detector*, Thesis for Master of Engineering submitted to the Massachusetts Institute of Technology, February 8, 1996.
- Yair et al., 2005, Y. Yair, C. Price, B. Ziv, P. L. Israelevich, D.D. Sentamn, F.T. Sao-Sabbas, A. Devir, M. Sato, C. Rodger, M. Moalem, E. Greenberg and O. Yaron, *Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission*, Geophys. Res. Lett., 32, L02801, (2005), doi:10.1029/2004GL021551.
- Yair et al., 2009, Yoav Yair, Colin Price, Michal Ganot, Eran Greenberg, Roy Yaniv, Baruch Ziv, Yosef Sherez, Adam Devir, Jo'zsef Bór and Gabriella Satori, *Optical observations of transient luminous events associated with winter thunderstorms near the coast of Israel*, Atmospheric Research, Volume 91, Issues 2-4, February 2009, Pages 529-537, 13th International Conference on Atmospheric Electricity - ICAE 2007, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.018
- Yang és Pasko, 2006, Yang, H., and V. P. Pasko, *Three-dimensional finite difference time domain modeling of the diurnal and seasonal variations in Schumann resonance parameters*, Radio Sci., 41, RS2S14, (2006), doi:10.1029/2005RS003402, [printed in 42(2), 2007].
- Yukhimuk et al., 1998, Yukhimuk, V., R. A. Roussel-Dupré, E. M. D. Symbalisty, and Y. Taranenko (1998), *Optical characteristics of Red Sprites produced by runaway air breakdown*, J. Geophys. Res., 103(D10), 11,473–11,482, doi:10.1029/98JD00348

Internetes hivatkozások

Infravörös műkoldképek

<http://hu.allmetsat.com>

http://wind.met.fu-berlin.de/wind/satellit/meteosat_loop.php

Villámfigyelő rendszerek Közép-Európában

Blitzortung: <http://www.blitzortung.org>

LINET: <https://www.nowcast.de>

EUCLID: <http://www.euclid.org>

SAFIR (Magyarország): <http://www.met.hu/kepek/blhh/index.php>

Gömbi trigonometria – alapszámítások, programkód

<http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>